

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Controlo de um pasteurizador com um autómato programável

Fernando Sousa e Silva

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Nuno Alexandre Cruz

Co-orientador: Eng. Pedro Lima Santos (Super Bock Group)

25 de Junho de 2018

Resumo

A presente dissertação foi realizada em âmbito empresarial, na empresa Super Bock Group.

A montagem de uma nova linha de enchimento dedicada a produções especiais, levou à aquisição de um novo pasteurizador, no entanto, sendo esta nova linha responsável por um nicho da produção total da fábrica, não se optou por um investimento demasiado elevado para a aquisição de máquinas de ponta para compor a linha. É neste contexto que surge esta dissertação que teve como objetivo controlar um pasteurizador em túnel através de um autómato programável.

O projeto será composto em dois grandes segmentos: o da automação e o da modelização e otimização do processo de pasteurização. É de salientar que somente com a implementação de um *PLC* será possível executar qualquer aplicação desenvolvida, uma vez que o pasteurizador não possui qualquer acessório capaz de armazenar dados ou implementar novas funcionalidades.

De modo a definir a constituição do autómato, irão ser analisados os esquemas elétricos do pasteurizador, definido o número e tipo de entradas e saídas e deste modo escolhido todos os módulos que irão formar a arquitectura do *hardware*. Esse *hardware* será todo da Siemens por oferecer uma gama de material abrangente e por ser bastante utilizado na empresa. Seguir-se-á a elaboração da lógica que irá efetuar o controlo do pasteurizador e do sistema de supervisão. A Siemens fornece *software* capaz de implementar e testar o que será idealizado.

Do ponto de vista da otimização, impõe-se conceber um modelo que permitirá validar hipóteses de funcionamento do pasteurizador. No processo de otimização propriamente dito, irá procurar-se conhecer as condições ideais de funcionamento da máquina, de modo a cumprir os requisitos impostos pela empresa, ao nível das unidades de pasteurização.

Abstract

This dissertation was carried out in a business environment, in the company Super Bock Group.

The assembly of a new filling line dedicated to special productions led to the acquisition of a new pasteurizer, however, since this new line was responsible for a niche of the total production of the plant, an investment was not too high for the acquisition of cutting edge machines to compose the line. It is in this context that this dissertation arises that had the objective of controlling a tunnel pasteurizer through a programmable *PLC*.

The project will be composed of two main segments: automation and modeling and optimization of the pasteurization process. It should be noted that only with the implementation of a *PLC* will it be possible to execute any application developed, since the pasteurizer does not have any accessory capable of storing data or implementing new functionalities.

In order to define the constitution of the *PLC*, the electric schemes of the pasteurizer will be analyzed, the number and type of inputs and outputs will be defined and thus all the modules that form the hardware architecture will be chosen. This hardware will be all in Siemens for offering a wide range of material and for being widely used in the company. The logic of the pasteurizer and supervisory system will be followed up. Siemens provides software capable of implementing and testing what will be idealized.

From the point of view of the optimization, it is necessary to conceive a model that will allow to validate hypotheses of operation of the pasteurizer. In the optimization process itself, it will be sought to know the ideal operating conditions of the machine, in order to meet the requirements imposed by the company, at the level of pasteurization units.

Agradecimentos

Todos os feitos e conquistas que foram alcançadas ao longo da minha vida, mais concretamente o meu percurso académico e, em particular esta dissertação, só foram possíveis de atingir devido às pessoas que me rodeiam e ao apoio por estas prestado.

Desta forma, antes de prosseguir com o documento, gostaria de agradecer a todos os que de uma maneira ou de outra me ajudaram no culminar do meu percurso académico.

Ao Professor Nuno Cruz, por todos os ensinamentos e conselhos passados, certamente algumas dores de cabeça terei provocado, mas sempre me incentivou a conseguir mais e melhor. Definitivamente o sucesso desta dissertação seria afetado, caso não fosse a sua contribuição.

Ao meu orientador na Super Bock Group, o Engenheiro Pedro Lima Santos, e a todas as pessoas que constituem o Serviço de Manutenção e Utilidades da empresa, pela integração que me proporcionaram, por toda a disponibilidade, pela partilha de conhecimento, sem dúvida foram uma enorme mais-valia para a minha formação enquanto pessoa e profissional.

Sem dúvida o maior agradecimento vai para a minha família e namorada, que tudo fizeram para proporcionar as condições ideais possibilitando-me atingir este objetivo. Tenho a noção dos sacrifícios a que se submeteram e das angústias que posso ter causado durante este período, mas a verdade é que sem tudo isso, talvez não pudesse assinalar este marco importante na minha vida. Afinal de contas, ultrapassar obstáculos permite-nos aprender e fortalecer-nos.

Fernando Silva

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Autômato Programável	6
2.2	Automação na indústria cervejeira	9
2.3	Controlo de um pasteurizador em túnel	10
3	Sistema de Controlo com PLC	13
3.1	Arquitectura do <i>hardware</i>	19
3.2	Programação da lógica do PLC	19
3.3	Testes	23
4	Modelização do Controlo do Pasteurizador	25
4.1	Análise teórica	25
4.1.1	Pasteurizador em túnel	25
4.1.2	Processo de pasteurização	26
4.1.3	Circuito de água	28
4.1.4	Pasteurizador da mini-fábrica	28
4.2	Modelo do processo de pasteurização	30
4.2.1	Verificação do modelo	34
5	Otimização do Pasteurizador	37
6	Resultados	43
7	Conclusões e Trabalho Futuro	49
7.1	Satisfação dos Objetivos	49
7.1.1	Principais Contribuições	49
7.2	Trabalho Futuro	50
	Referências	51

Lista de Figuras

1.1	<i>Layout</i> da linha de enchimento da mini-fábrica	2
2.1	Interface de entradas e saídas, à esquerda, <i>CPU</i> , à direita	7
2.2	Exemplo de programação em <i>LD</i>	8
2.3	Exemplo de programação em <i>FBD</i>	8
2.4	Exemplo de programação em <i>SFC</i>	8
2.5	Exemplo de programação em <i>IL</i>	8
2.6	Exemplo de programação em <i>ST</i>	9
3.1	Página do esquema do manual elétrico do pasteurizador	14
3.2	Esquema elétrico do transportador	16
3.3	Esquema elétrico das válvulas	17
3.4	Esquema do circuito de emergência	18
3.5	<i>Grafcet</i> do funcionamento de uma das válvulas de água	20
3.6	<i>Grafcet</i> do funcionamento de uma das válvulas de vapor	21
3.7	<i>Grafcet</i> do funcionamento do tapete de entrada	21
3.8	<i>Grafcet</i> do funcionamento do tapete do túnel	22
3.9	<i>Grafcet</i> do funcionamento do soprador	22
3.10	<i>PLC</i> virtual	24
4.1	Fases do processo de um pasteurizador em túnel	26
4.2	Gráfico que relaciona a temperatura dos banhos com as UP's/min	27
4.3	Esquema do circuito de água num pasteurizador em túnel	28
4.4	Pasteurizador em túnel	29
4.5	Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 1	31
4.6	Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 2	31
4.7	Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 3	32
4.8	Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 4	32
4.9	Modelo em <i>Simulink</i> do processo de pasteurização	34
4.10	Gráfico resultante do modelo criado	36
5.1	Sequência realizada pelo modelo	37
5.2	Sequência a efetuar pelo <i>PLC</i>	37
5.3	Valores teóricos dos <i>setpoint</i> dos banhos	38
5.4	Valores reais dos <i>setpoint</i> dos banhos	38

5.5	Transição da temperatura Z3-Z4 em garrafas 330 ml para 80 UP	39
5.6	Transição da temperatura Z3-Z4 em garrafas 330 ml para 60 UP	39
5.7	Programa em <i>Simulink</i> capaz de definir Δt_i	41
5.8	Programa em <i>Simulink</i> capaz de definir T_4	42
6.1	Quadro do pasteurizador	44
6.2	Painel de controlo da <i>HMI</i> que emula o quadro do pasteurizador	45
6.3	Painel que simula o enchimento dos tanques	45
6.4	Painel que simula o circuito da água	46

Lista de Tabelas

3.1	Número e tipo de entradas e saídas do <i>PLC</i>	19
4.1	Modos de funcionamento do pasteurizador	30
4.2	Variáveis para o ciclo de funcionamento para as garrafas 750ml-80 UP	34
4.3	Variáveis para modo 3	35
4.4	Variáveis para modo 2	35
4.5	Variáveis para modo 1	35
6.1	Exemplo para as garrafas 750ml das combinações de <i>setpoint</i>	47
6.2	Novas combinações de <i>setpoint</i>	48

Abreviaturas e Símbolos

CIP	<i>Cleaning-In-Place</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
FBD	<i>Function Block Diagram</i>
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IL	<i>Instruction List</i>
LD	<i>Ladder Diagram</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition</i>
SFC	<i>Sequential Function Chart</i>
ST	<i>Structured Text</i>
UP	Unidade de Pasteurização

Capítulo 1

Introdução

No mundo moderno em que se vive, e com o constante avanço da tecnologia, já não é surpreendente ver-se automóveis que estacionam sozinhos, ou linhas de fábricas gigantes sem qualquer tipo de trabalho manual.

A automação veio dar aos ambientes industriais uma robustez e eficiência que de outra forma não seria possível atingir, se continuassem a ser os seres humanos a executar certas tarefas. A produção da cerveja não escapou à evolução do mundo, e também ela se transformou. Sendo um processo cíclico, tinha todas as condições para ser automatizado e diminuir a mão de obra em tarefas monótonas e repetitivas. E foi exatamente isso que aconteceu. Mas o mercado industrial está sempre em busca de novas metas, novos objetivos, melhores performances, e a melhoria contínua dos processos é algo que todas as empresas procuram.

No mercado cervejeiro, após o aprimoramento do processo geral, apenas isso não chega, pois o processo passa por vários estágios desde a sua criação até à entrega ao consumidor final. E é necessário olhar para cada uma das fases do processo, e procurar melhorá-lo e torná-lo mais eficiente e rentável.

Uma das várias fases da produção da cerveja, é a pasteurização. Esta técnica tem vindo a ser aplicada a produtos como queijo, leite, vinho. O facto de ser um procedimento aplicado a vastas áreas, é alvo de um estudo constante, de modo a encontrar técnicas de melhoramento e aperfeiçoamento do controlo do processo.

Sendo a empresa líder em venda de bebidas a nível nacional e procurando cada vez mais a afirmação internacional, a Super Bock Group procura formas de inovar, seja com o lançamento de novos produtos, seja com o melhoramento dos seus métodos de produção.

1.1 Enquadramento

A presente dissertação foi realizada em ambiente empresarial, numa colaboração entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a Super Bock Group SA, num período de cerca de 5 meses, equivalente a um semestre lectivo.

A fábrica de Leça do Balio da Super Bock Group é composta por várias linhas de fabrico, cada uma capaz de produzir diferentes produtos, desde os vários tipos de cerveja à sidra, bem como em diferentes recipientes e de diferente volumetria.

Uma dessas linhas, conhecida por mini-fábrica, é a linha mais pequena na empresa, observe-se o *layout* na figura 1.1. A mini-fábrica é responsável por uma percentagem muito pequena de produção. Direcionada para produções especiais ou edições limitadas. É uma linha pouco flexível, produzindo poucos formatos.

Ao contrário das outras linhas que têm uma produção de dezenas de milhares de unidades por hora, a linha da mini-fábrica fica-se pelas 1500 garrafas por hora. É natural que as linhas de maior produção sejam dotadas de um maior número de máquinas e estas mais evoluídas tecnologicamente.

Semelhante à composição de todas as linhas da fábrica, a linha de enchimento da mini-fábrica é composta por uma enchedora onde as garrafas são enchidas com o produto pretendido, seguem para o capsulador responsável por colocar a cápsula que vai selar a garrafa. Como acontece nas outras linhas, uma das máquinas existente na linha é o pasteurizador. Mas em oposição aos restantes pasteurizadores existentes na fábrica, este foi construído com uma tecnologia algo ultrapassada. Para finalizar, as garrafas são direcionadas para a rotuladora, onde são aplicados os rótulos e se necessário, os contra-rótulos às garrafas.

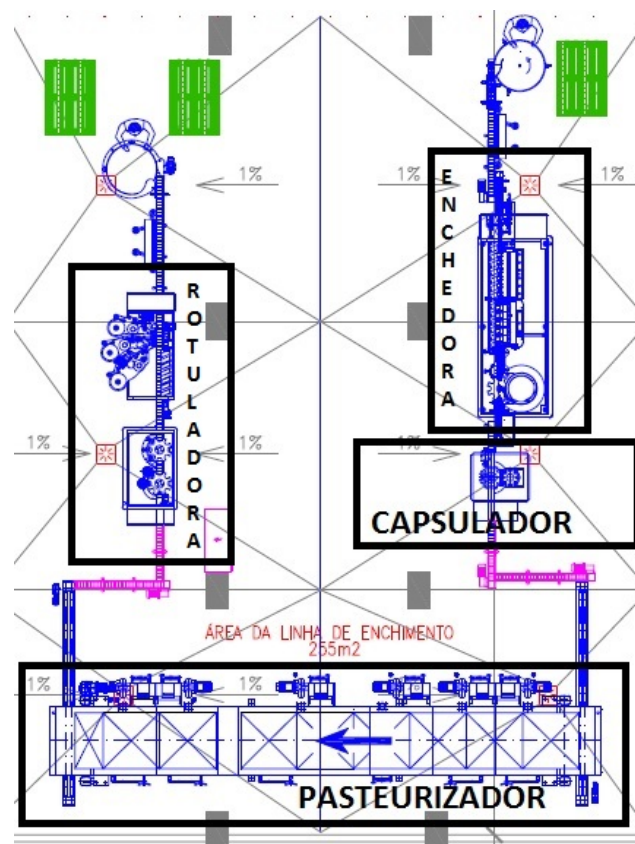


Figura 1.1: *Layout* da linha de enchimento da mini-fábrica

1.2 Objetivos

A dissertação "Controlo de um pasteurizador com um autómato programável" teve em vista melhorar o funcionamento do pasteurizador existente na mini-fábrica.

O desafio passou por implementar um controlador que permita gerir as UP (unidades de pasteurização) de modo mais preciso ao que foi encontrado, de acordo com as necessidades de cada tipo de mercadoria colocado na linha de produção. Para tal, foi necessário refazer a tecnologia de controlo do pasteurizador da mini-fábrica e substituí-lo por um *PLC* (*Programmable Logic Controller*). Desta forma, teremos uma ferramenta que permitiria aceder a todos os componentes da máquina e registar dados em tempo real, função essencial para a dissertação.

Com a ajuda de um *PLC*, foi possível substituir na totalidade o circuito de controlo por um sistema moderno. E assim, otimizar a máquina sem necessitar da sua substituição completa por uma nova.

Ainda se desenvolveu uma Interface Homem-Máquina (*HMI*) que também irá funcionar como sistema de supervisão do processo, mais concretamente um *SCADA*.

O projeto está inserido na unidade curricular denominada Dissertação, que constitui uma das unidades que compõe o Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (MIEEC), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A obtenção de resultados positivos controlo de um processo complexo como a pasteurização é algo que pode trazer uma redução de custos assinalável, bem como elevar a eficiência não só da máquina mas de toda a linha.

1.3 Metodologia

Para um trabalho complexo como este, e uma vez que envolve algumas etapas que necessitam ser terminadas para poder iniciar outras, tornou-se indispensável um planeamento cuidado e adequado ao período de tempo disponível.

Numa fase inaugural, de análise do manual elétrico do pasteurizador e assimilação do processo de funcionamento deste tipo de equipamento, foi necessário recorrer ao apoio dos técnicos que normalmente lidam com esta máquina para confirmar *in loco* que as conclusões tiradas no plano teórico, realmente se confirmavam no desempenho real da máquina. Isto permitiu não só uma assimilação mais célere da informação, bem como ter a perspetiva de pessoas que utilizam esta máquina regularmente sobre que funções melhorar ou até implementar novas funcionalidades.

Numa fase de elaboração dos programas que foram passados posteriormente para memória do *PLC*, foi utilizado o *software* pertencente à empresa fabricante do *PLC* a ser utilizado. Esse *software* de programação, *SIMATIC Step7*, para além de permitir implementar os esquemas, fornece uma ferramenta que disponibiliza um autómato virtual, permitindo desta forma simular o programa criado e assim testá-lo à medida que ia sendo desenvolvido. Foi uma ferramenta bastante útil, já que não havia na fábrica nenhum *PLC* disponível para testes.

Durante a preparação dos esquemas para o autômato, foram surgindo raciocínios relativos a hipóteses de melhoramento do processo de pasteurização. Essas hipóteses foram testadas simulando num *software* bastante utilizado no decorrer do curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, o *MatLab*, e ainda uma aplicação deste programa, mais adaptado para simulação de blocos, o *Simulink*.

1.4 Estrutura da Dissertação

Além da introdução, esta dissertação contém outros 6 capítulos.

No capítulo 2 é descrito o estado da arte, onde são apresentados conceitos fundamentais para o desenvolvimento do projeto.

No capítulo 3 é detalhado o processo que levou à utilização de um *PLC* nesta dissertação, bem como o seu dimensionamento e programação.

No que diz respeito ao capítulo 4 expõe-se a criação do modelo térmico no qual resultam as unidades de pasteurização.

No capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento de uma otimização ao processo de pasteurização a controlar, resultando num conjunto de perfis de temperatura a serem aplicados.

Seguidamente, no capítulo 6 são expostos os resultados atingidos nas várias vertentes que compuseram o projeto.

Por fim, no capítulo 7 sumaria-se as conclusões alcançadas, assim como se discute trabalhos futuros no âmbito do tema da dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Com a evolução industrial, começou a surgir uma área de estudo inerente ao fenómeno industrial, a automação. Com isso, foi possível substituir a mão-de-obra falível humana por máquinas, melhorar eficiência através do aumento de qualidade e precisão nos processos.

Inicialmente, a tecnologia de automação funcionava à base de contactores e relés. Atualmente, a base de toda a automação são os *PLC's*. Indispensáveis na automação tal como a conhecemos, os autómatos programáveis, mais conhecidos por *PLC*, são computadores de dimensões reduzidas que estão devidamente aptos a funcionar em ambientes extremos, como os existentes nos interiores de fábricas industriais, com temperaturas elevadas, humidade, vibrações e poeiras, tornando-os ideais para controlo de processos e máquinas.

Os *PLC* são amplamente usados na indústria cervejeira, e em fases distintas da produção. Nos dias que correm, cada uma das etapas que faz parte da produção de cerveja é altamente automatizada. Desta forma as empresas responsáveis pela fabrico deste tipo de bebida procuram homogeneizar fases e tornar qualquer lote do mesmo produto igual, quer seja produzido em Portugal, no rigoroso inverno siberiano ou no calor do deserto egípcio.

Etapas como a fermentação [1], enchimento, processo de limpeza, tipo CIP (*Cleaning-In-Place*) [2] ou etiquetagem, são exemplos de fases do processo de produção de cerveja onde se encontram vários modos de automação industrial.

Uma das várias fases por qual passa a cerveja, é a pasteurização. Esta etapa confere ao produto uma maior vitalidade e procura eliminar micro-organismos nocivos que possam afetar a saúde humana.

A pasteurização é uma etapa crítica para a obtenção de um produto final de qualidade. E como seria de esperar, é alvo de vários estudos, com vista a melhorar o rendimento deste processo, seja ao aumentar as quantidades de produto pasteurizado por unidade de tempo, seja providenciando um prazo mais alargado de vitalidade da cerveja.

Na pasteurização, é preciso ter em conta dois fatores: a temperatura a que vamos submeter o produto e o intervalo de tempo ao qual o produto é sujeito a essa temperatura. Da combinação destes dois resultam as Unidades de Pasteurização que nos indicam o grau de pasteurização a que submetemos o produto. [3]

Existem várias técnicas de pasteurização na indústria. Na fábrica da Super Bock Group, em Leça do Balio, existem dois métodos a ser aplicados. Nas linhas de barril, utiliza-se a pasteurização *flash*, já nas linhas de garrafa o processo é feito através da pasteurização em túnel.

A pasteurização *flash* é caracterizada por ser aplicada antes do enchimento, assim sendo apenas a cerveja é pasteurizada e não a embalagem, contrariamente ao que se sucede na pasteurização em túnel, onde ambos (cerveja e recipiente) são pasteurizados.

Num pasteurizador em túnel, uma das variáveis controlada é a velocidade do tapete de transporte. Uma vez que o comprimento do túnel é fixo, a velocidade do tapete influencia diretamente o período de tempo a que submetemos as garrafas. A outra variável será a temperatura do banho ou banhos de pasteurização.

2.1 Autómato Programável

Na concepção de uma solução para o desafio proposto, isto é, controlar o processo de um pasteurizador através de um *PLC* e ser capaz de otimizar o seu funcionamento, contemplam-se dois campos de trabalho: a automação, no que afeta à programação de um controlador para uma máquina, e teoria de controlo, que foca no processo em si e em como é possível melhorá-lo.

Um autómato programável é um controlador capaz de analisar continuamente os aparelhos ligados às entradas, e com base num programa armazenado em memória, gera sinais de atuação nas saídas.

O seu uso permite uma redução em custos energéticos e de mão-de-obra, monitorizar o processo, recolha de dados em tempo real e acima de tudo tornar o processo menos variável devido à capacidade de repetitividade de um autómato.

Estes dispositivos foram desenhados para implementação de funções específicas como temporização, contagem de eventos, sequências lógicas através de entradas e saídas, analógicas ou digitais. São compostos por:

- Fonte de alimentação
- Processador
- Interface de entradas e saídas para periféricos
- Memória
- Interface de comunicação com outros equipamentos

O *PLC* tem como modo de funcionamento, um modelo cíclico. Inicialmente lê as entradas, executa o programa que foi passado para a memória do *PLC* e atualiza as saídas.

Existem dois tipos destes dispositivos: autómatos compactos e autómatos modulares. Os autómatos modulares são compostos por vários módulos, cada um responsável por uma função individual, exemplo figura 3.10. Enquanto os primeiros são compostos por um único bloco, constituído



Figura 2.1: Interface de entradas e saídas, à esquerda, CPU, à direita

por todas as partes integrantes de um PLC. A grande vantagem dos modulares, é que são mais flexíveis, no sentido em que se pode adaptar o número e o tipo de entradas e saídas com novos módulos, ou aumentar a memória conforme a necessidade.

De modo a padronizar a área dos autômatos programáveis, foi criada uma norma pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*), inicialmente denominada IEC 1131, mas posteriormente nomeada IEC 61131 devido a uma reestruturação por parte do IEC. Essa norma é dividida em 7 partes desde as linguagens de programação, aos protocolos de comunicação, às questões de segurança.

No que refere à programação destes aparelhos, a parte 3 da norma IEC 61131 é responsável por padronizar as linguagens. Definindo 5 linguagens: *Ladder* (LD), *Instruction List* (IL), *Structured Text* (ST), *Sequential Function Chart* (SFC) e *Function Block Diagram* (FBD). [4]

Na origem da linguagem *Ladder* estão os esquemas elétricos com relés e contactores, como se comprova na figura 2.2. É uma linguagem simples, de baixo nível, difícil de ler e interpretar em programas extensos.

Na figura 2.5, tem-se o exemplo da linguagem *IL*, uma linguagem textual, teve origem no *Assembly*, é uma linguagem rápida, de baixo nível e com baixo consumo de memória mas com dificuldades em construir ciclos e estruturas complexas.

O *ST* como o próprio nome indica é uma linguagem textual, de alto nível, similar ao Pascal, verifica-se na figura 2.6. Ao contrário do *IL* permite construir estruturas complexas e ciclos (FOR/WHILE).

Quanto ao *FBD* é uma linguagem gráfica de alto nível. Incorpora conceitos de programação orientada a objetos, e é bastante utilizada na indústria de processos, exemplo na figura 2.3

SFC é uma linguagem gráfica, ideal para a implementação de máquinas de estados, que foi o utilizado para a concepção da lógica do pasteurizador, figura 2.4.


```
F8:10 := 0;  
WHILE (N7:0 < 5) DO  
    F8:10 := F8:10 + F8:[N7:0];  
    N7:0 := N7:0 + 1;  
END_WHILE;
```

Figura 2.6: Exemplo de programação em *ST*

2.2 Automação na indústria cervejeira

Nos últimos anos, algumas empresas fabricantes de máquinas começam a oferecer equipamentos já desenvolvidos a pensar em linhas de enchimento de bebidas, como as existentes na Super Bock Group. Máquinas essas devidamente automatizadas e adaptadas às exigências das empresas compradoras.

Apesar de haver muita oferta de maquinaria, a informação é algo escassa. Sendo uma área comercial, é natural que as organizações não tornem informação pública, nem partilhem evoluções tecnológicas umas com as outras. O objetivo passa por obter fins lucrativos e não tanto com publicações de âmbito científico, guardando as pesquisas para si.

Ainda assim, existe trabalho académico nesta área e em áreas similares, e foi com base nesses projetos que se suportou a presente dissertação.

Uma das empresas que dispõe de maquinaria construída diretamente para a indústria cervejeira, nomeadamente aparelhos e produtos para o controlo de temperatura, semelhantes aos usados na pasteurização, bem como aplicados a essa etapa. Através de sensores de temperatura é medida a temperatura real a que está a ser submetido um produto e um controlador é responsável por efetuar os cálculos das UP's que vão ser aplicados ao produto. [5]

Os sensores de temperatura são sensores PT100, de classe A, com precisão ± 0.3 °C. [6] É necessário este tipo de precisão, dado que num processo de pasteurização a temperatura influencia o número de UP's não linearmente. E uma ligeira alteração na temperatura, pode resultar em variedades consideráveis entre as UP's teóricas e as reais.

O que se verifica em [5], no caso da pasteurização, é que o controlo é apenas dirigido para a variável temperatura, não havendo referência ao período de tempo a que o produto está sujeito ao efeito da pasteurização. Um controlo sobre as duas variáveis seria algo mais robusto.

Num dos poucos trabalhos científicos, num projeto conduzido no Brasil, foi realizado o controlo automatizado de uma micro produção de cerveja. [7] Semelhante a esta dissertação, o controlo é realizado através de um *PLC*, e apesar de não se focar na etapa de pasteurização, centra-se no processo de fabrico da cerveja, com ênfase no controlo de temperaturas e de períodos de tempo.

No estudo realizado por Fernandes e Franzen, 2011 [7], existe uma quantidade de passos que é preciso efetuar de maneira a resultar um produto final, tal como numa receita. Foi apenas programada a lógica desses passos, passados os parâmetros para o controlador e no final verificou-se que a variabilidade foi menor do que se fosse feita por uma pessoa. A automação permite essa melhoria na obtenção de produto final com as mesmas características.

Algo que poderia complementar esta pesquisa, seria uma análise do processo automatizado, em busca das condições ideais de produção, em substituição de apenas seguir uma "receita" previamente fornecida.

2.3 Controlo de um pasteurizador em túnel

Uma das etapas num processo de produção de cerveja é a pasteurização. Como já foi evidenciado, a pasteurização depende do período de tempo e da temperatura de pasteurização. Juntamente com outras fases, a pasteurização necessita de um controlo rigoroso das suas duas variáveis, nomeadamente da temperatura, para corresponder aos, cada vez mais, apertados critérios de qualidade. Segundo a fórmula 2.1

$$UP(t, T) = t \times 1.393^{(T-60)} [8] \quad (2.1)$$

retira-se que a temperatura será a variável mais crítica, já que tem uma variação exponencial. Isto faz com que o controlo necessite ser preciso, ligeiras alterações podem resultar num número total de UP diferente do esperado, deixando de corresponder aos critérios estabelecidos.

$$UP(10, 65) = 52.45 \quad (2.2)$$

$$UP(10, 65.3) = 57.935 \quad (2.3)$$

Observa-se no exemplo acima, a importância que terá a precisão do controlo da temperatura, no resultado final do total das unidades de pasteurização.

Existem algumas abordagens para o controlo de um pasteurizador em túnel. Num projeto de 2008, é efetuado um controlo de todo o processo com base no controlo de movimento das grelhas transportadoras de garrafas [9]. Também recorrendo a um *PLC*, foi substituído o circuito de controlo para permitir aceder a todos os componentes da máquina, e assim facilitar alterações. Após um estudo sobre dois métodos de controlo das grelhas através de sensores e de temporizadores, chegou-se a conclusão que o mais eficaz seria o primeiro método. Não obstante a solução por temporização necessitar de um menor número de entradas, esta quando comparada com o método

através de sensores é mais susceptível a erros de sincronismo. Dado que dependem apenas dos temporizadores internos do *PLC*, qualquer erro no sistema ou comando indevido afetará todo o processo, deixando de ser síncrono.

Neste estudo, abordam a questão do controlo de posição, de maneira à variável tempo do processo ser totalmente controlada. Não houve um foco relativo à outra variável do processo, a temperatura. Posto isto, o estudo é válido e útil mas carece de uma análise do impacto das alterações de temperatura no processo de pasteurização.

Numa diferente abordagem Jonas, 2009 [10] elabora um modelo simplificado do pasteurizador. É depois analisado qual será a temperatura ótima dos banhos de pasteurização e a correspondente velocidade do tapete, de modo a obter as UP's pretendidas. O estudo neste caso, já é analisado como um todo, e não com variáveis independentes entre si.

Foi testado o comportamento do modelo, aquando paragens a meio do processo e a sua influência na contagem de UP's finais. Dos testes realizados, comparou-se com amostras do processo não controlado. Quando existem paragens o controlador atua nas temperaturas, baixando-as para um valor que não permita a adição de UP's pelo produto. Neste processo de diminuição do valor de temperatura e mais tarde, no reinício do funcionamento do pasteurizador, existe um acréscimo de UP's. Esse acréscimo faz com os valores de UP's saiam dos valores de referência, resultando em sobre-pasteurização. Ainda assim, comparando as amostras com o processo não controlado constata-se que o efeito de sobre-pasteurização no processo controlado é muito próximo dos valores de referência, ao contrário dos valores do não controlado, são aproximadamente o dobro.

Apesar de ser um estudo valioso e bastante útil analisou apenas o recipiente localizado no centro de cada zona de temperatura, ao passo que o que se pretende é uma pasteurização homogénea por todos os recipientes.

Capítulo 3

Sistema de Controlo com *PLC*

Como etapa essencial para o sucesso do projeto tem-se a alteração de todo o sistema de controlo da máquina pasteurizadora. Os objetivos desta alteração são possibilitar:

- reprogramar a lógica do processo;
- ter acesso a informação em tempo real;
- armazenar dados em memória;
- aceder e controlar todos os componentes do pasteurizador.

No primeiro contacto com a máquina e com o quadro elétrico notou-se que a tecnologia usada para efetuar o controlo já não é comumente utilizada nos dias de hoje. O estudo do manual elétrico veio confirmar que realmente se tratava de um controlo datado, efetuado através de lógica cablada, que usava relés e contadores de modo a disparar ou desativar os mecanismos de atuação na máquina.

Tornou-se indispensável alterar o controlo da máquina. Da maneira que estava desenhada, seria necessário andar a desviar cabos para alterar qualquer procedimento. Para além de que no futuro, qualquer implementação de outra melhoria levaria a nova reorganização de cabos e fios elétricos, tornando qualquer projeto de aperfeiçoamento pouco prático, moroso e, consequentemente, dispendioso.

Concluiu-se que a aplicação de um *PLC* é a melhor ferramenta para substituir o esquema atual, cujo diagrama de ligações está representado na figura 3.1. Este irá permitir um maior controlo sobre os componentes, tornando a máquina mais evoluída, para além de que um *PLC* permite o registo de dados, o que irá permitir assinalar avarias ou comportamentos indesejados do pasteurizador. Qualquer alteração do funcionamento passa a ser efetuado em *software*, evitando modificações físicas.

O manual elétrico fornecido, que contém os esquemas elétricos que compõe a lógica de controlo do pasteurizador, é bastante extenso e de difícil análise devido às ligações por vezes estarem em páginas diferentes e até em secções distintas.

De modo a facilitar a análise dos esquemas elétricos que se distribui por diversas páginas, foram desenhados novos esquemas. Foram feitos esquemas que permitiram agregar os circuitos pela respetiva função, utilizando anotações para a descrição de cada linha e desta forma simplificar a interpretação, como verificado nas figuras 3.2, 3.3 e 3.3.

À medida que se foi decodificando o manual elétrico, elaboraram-se, em simultâneo, os esquemas dos programas que iriam ser passados para o *PLC*. Esses esquemas foram projetados em *Grafcet*, por ser uma linguagem familiar e por ser uma linguagem que se adequa a este tipo de funcionamento, do tipo máquina de estados com ações e transições. Complementando o *Grafcet*, foi utilizado *Ladder*.

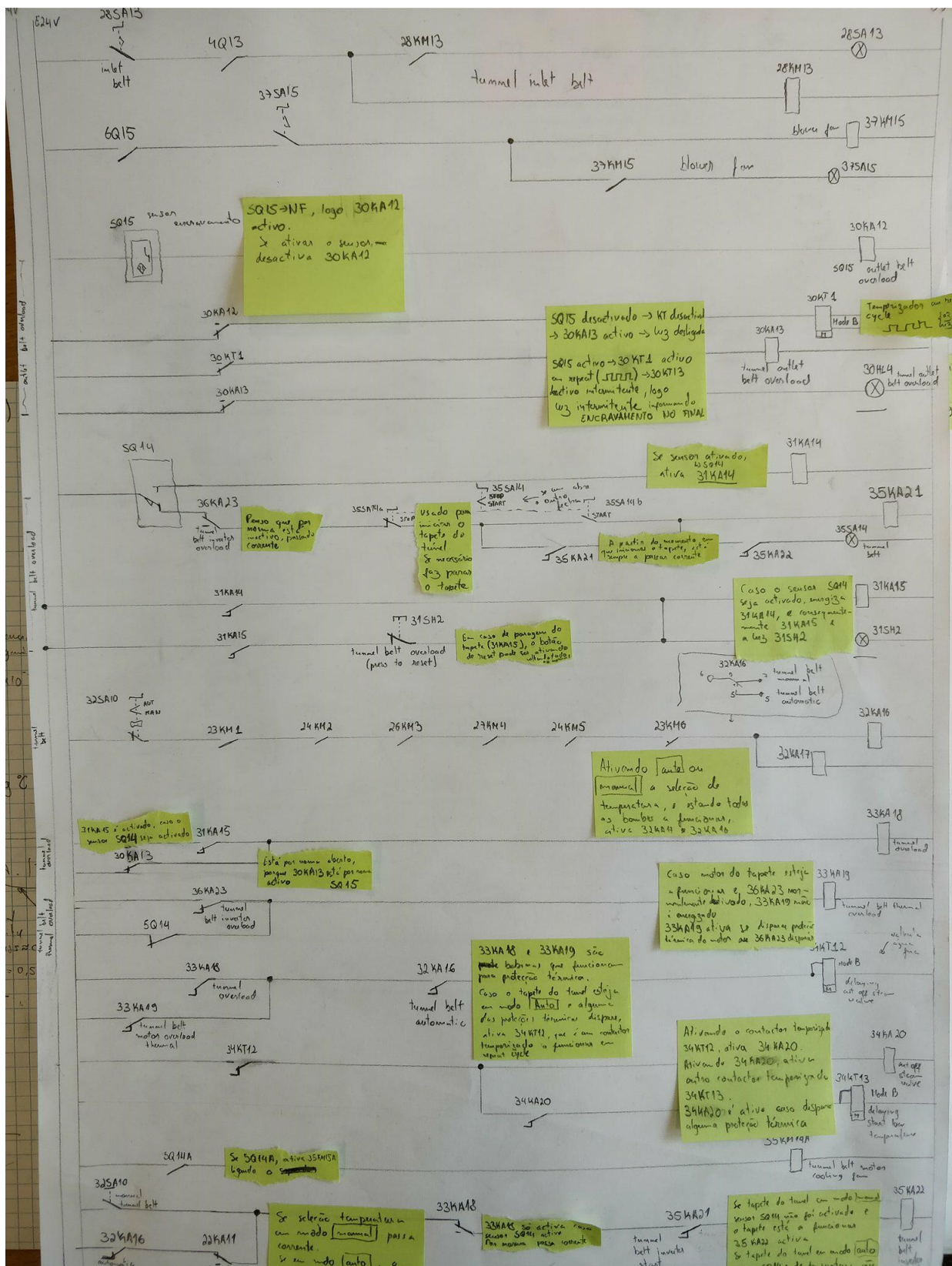


Figura 3.2: Esquema eléctrico do transportador

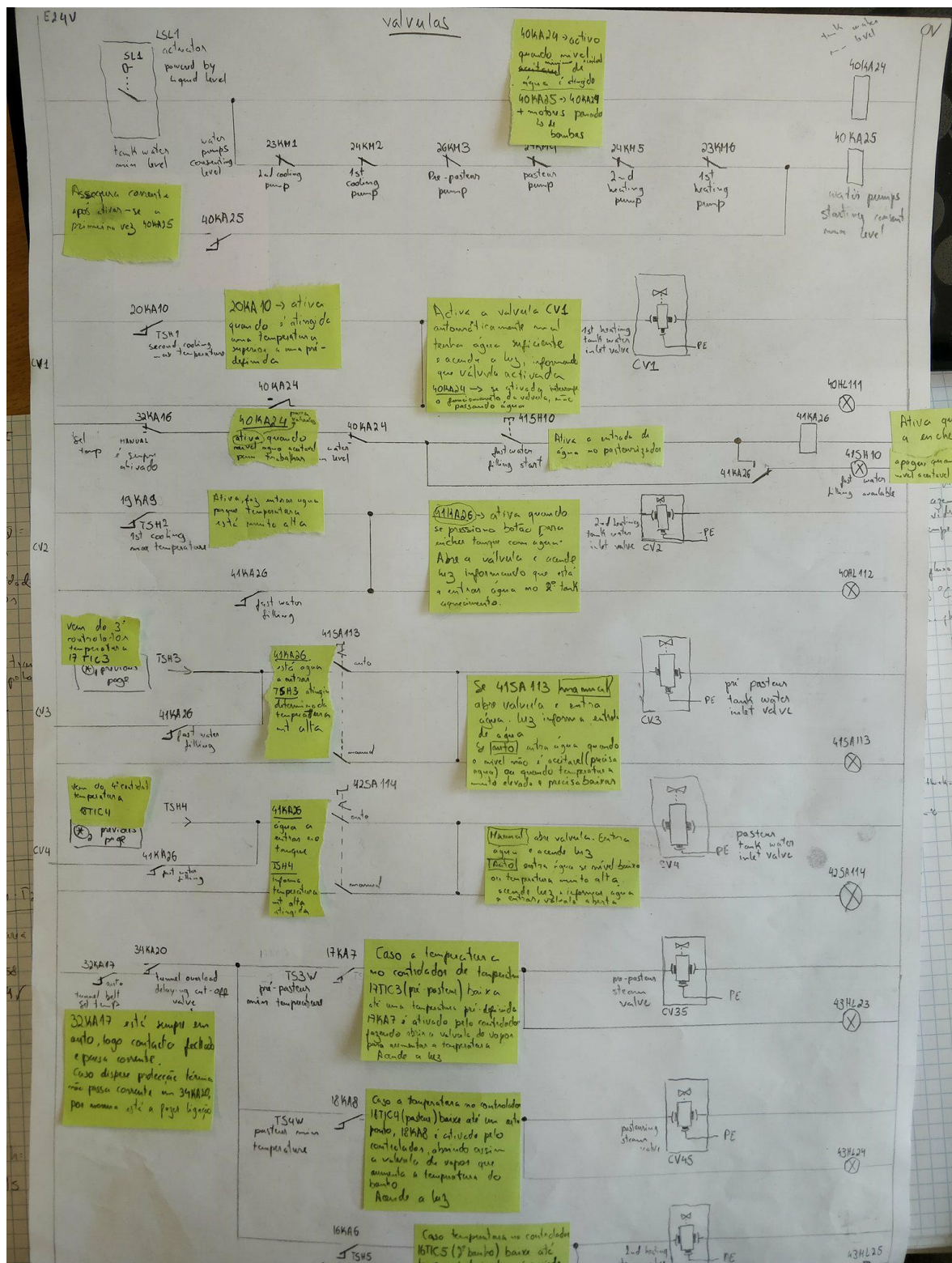


Figura 3.3: Esquema elétrico das válvulas

3.1 Arquitectura do *hardware*

Através da concepção dos novos esquemas, foi possível começar a perceber quais seriam as entradas e saídas que iriam ser passadas ao autómato, e os seus respetivos tipos, permitindo também iniciar a arquitectar o *hardware* a ser utilizado. Por meio do número e tipo de entradas e saídas, será definido quais cartas I/O a utilizar.

Na Super Bock Group existe uma utilização assinalável de autómatos, aplicados a várias máquinas. Por facilidade de aquisição e familiarização dos técnicos com estes equipamentos, sugeriu-se a utilização de dispositivos da Siemens.

Assim sendo, o CPU escolhido foi um Siemens S7 da família 300, por ser uma gama com capacidade de processamento suficiente para este tipo de projeto. Mais concretamente o CPU 318-2, definido após discussão com o orientador na empresa e dos técnicos, já bastante experientes neste tipo de tomada de decisões.

Quanto às interfaces de entrada e saída, após a análise detalhada do manual elétrico, resultou a tabela 3.1

Tabela 3.1: Número e tipo de entradas e saídas do *PLC*

	ENTRADAS	SAÍDAS
ANALÓGICAS	6	0
DIGITAIS	17	39
TOTAL	23	39

Com estas informações foram escolhidos os módulos que melhor se adaptam às especificações, escolhendo módulos com algumas entradas e saídas de sobra por questões de precaução.

Concluindo, a arquitectura do *hardware* fica assim completa e o *PLC* será constituído por:

- CPU Siemens 318-2 Ref: 6ES7 318-2AJ00-0AB0 [11]
- Módulo de 8 entradas analógicas da Siemens Ref: 6ES7 331-7PF00-0AB0
- Módulo de 16 entradas digitais e 16 saídas digitais da Siemens Ref: 6ES7 323-1BL00-0AA0
- Módulo de 16 entradas digitais da Siemens Ref: 6ES7 321-1BH02-0AA0
- Módulo de 32 saídas digitais da Siemens Ref: 6ES7 322-1BL00-0AA0

3.2 Programação da lógica do *PLC*

Todos os fabricantes de autómatos, providenciam *software* específico que permite a programação dos seus autómatos. A Siemens não é diferente, e fornece vários programas para serem usados com os seus aparelhos físicos.

Nesta dissertação foram usados dois desses programas. O *SIMATIC Step7* para programar toda a lógica que mais tarde foi passada para o *PLC*, e o *WinCC* onde foi criada uma interface homem-máquina, sobre a forma de um *SCADA*.

A princípio foram produzidos os esquemas da lógica manualmente e feito o *debugging* com técnicas aprendidas em algumas unidades curriculares pertencentes ao MIEEC. Para estes esquemas foram utilizados duas linguagens, *Ladder* e *Grafcet*, de modo a completarem-se uma à outra. Utilizou-se o *Ladder*, uma vez que temos bastantes esquemas elétricos, e visto que essa é a origem desta linguagem considerou-se adequada. O *Grafcet* por sua vez é uma linguagem que se adequa perfeitamente a máquinas de estados, que foi o utilizado para dimensionar o funcionamento do pasteurizador, figura 3.5.

São duas linguagens passíveis de serem implementadas pelo *software* escolhido, que se consideram adequadas para as aplicações idealizadas.

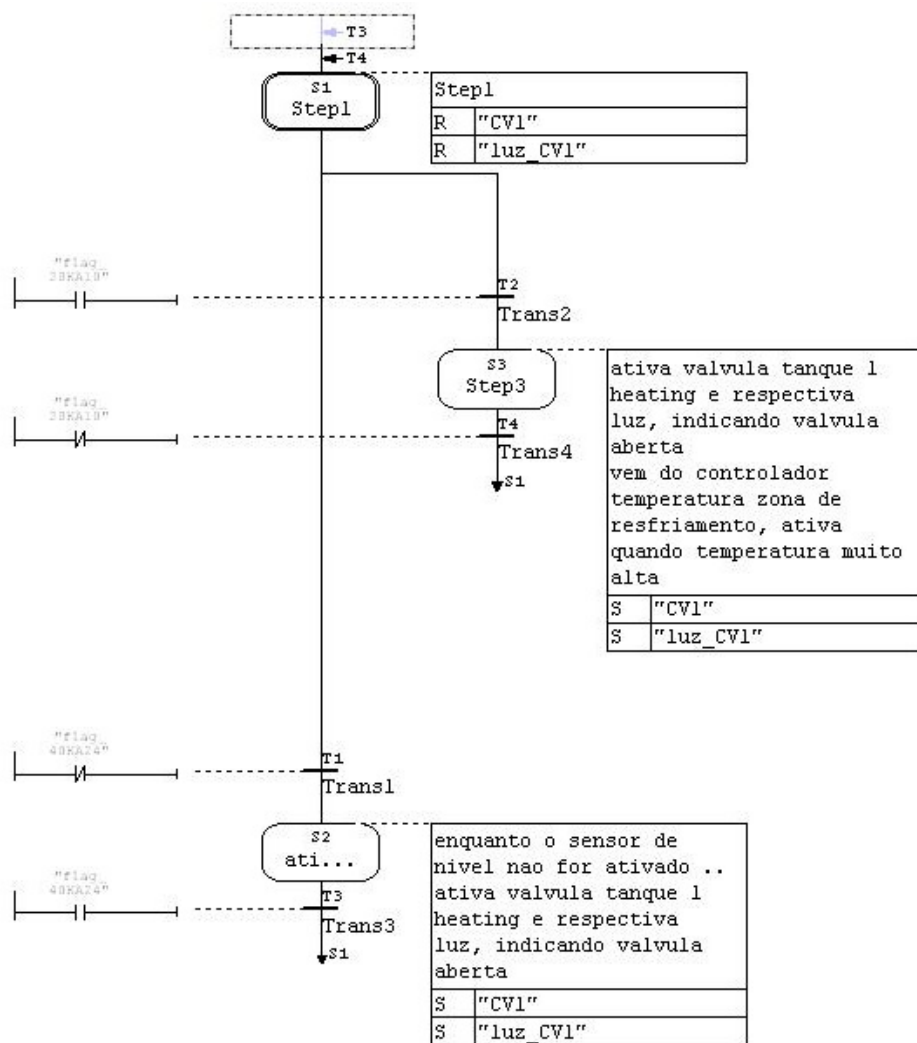


Figura 3.5: *Grafcet* do funcionamento de uma das válvulas de água

Na figura 3.5 está representado um excerto do código criado em *Grafcet*. Sumariamente, em cada *Step* são programadas as várias ações a ser aplicadas, caso a transição seja despoletada é ativado o *Step* seguinte, e assim sucessivamente.

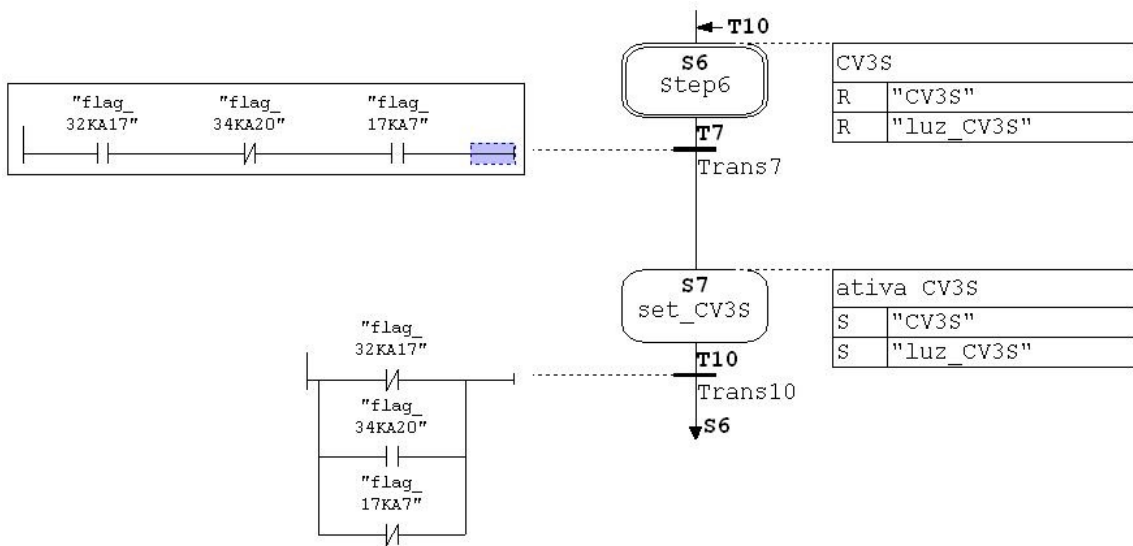


Figura 3.6: *Grafcet* do funcionamento de uma das válvulas de vapor

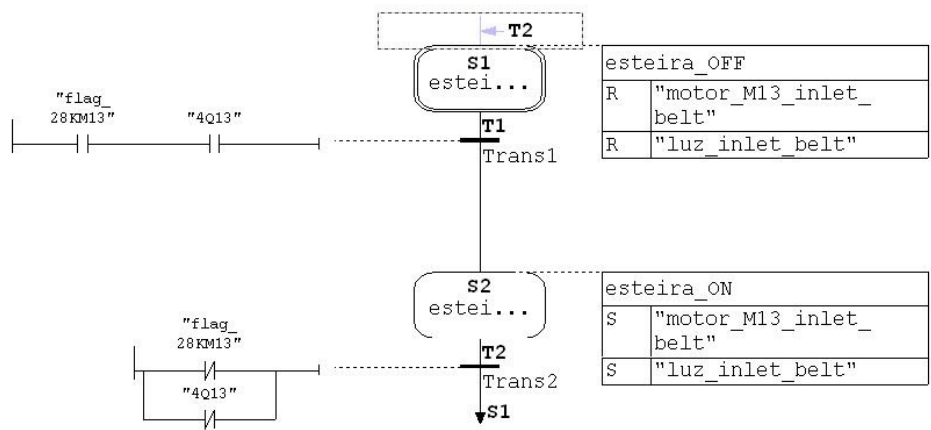


Figura 3.7: *Grafcet* do funcionamento do tapete de entrada

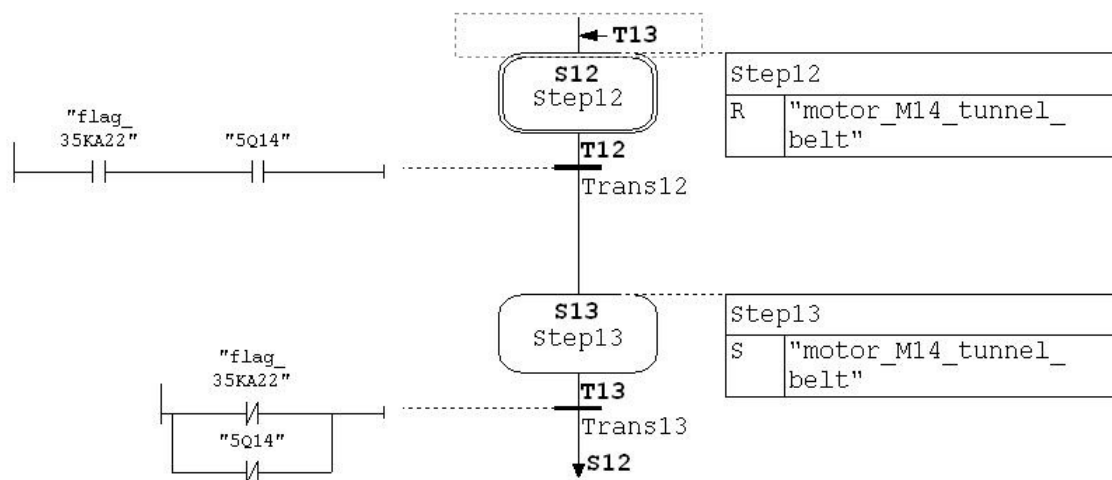


Figura 3.8: *Grafcet* do funcionamento do tapete do túnel

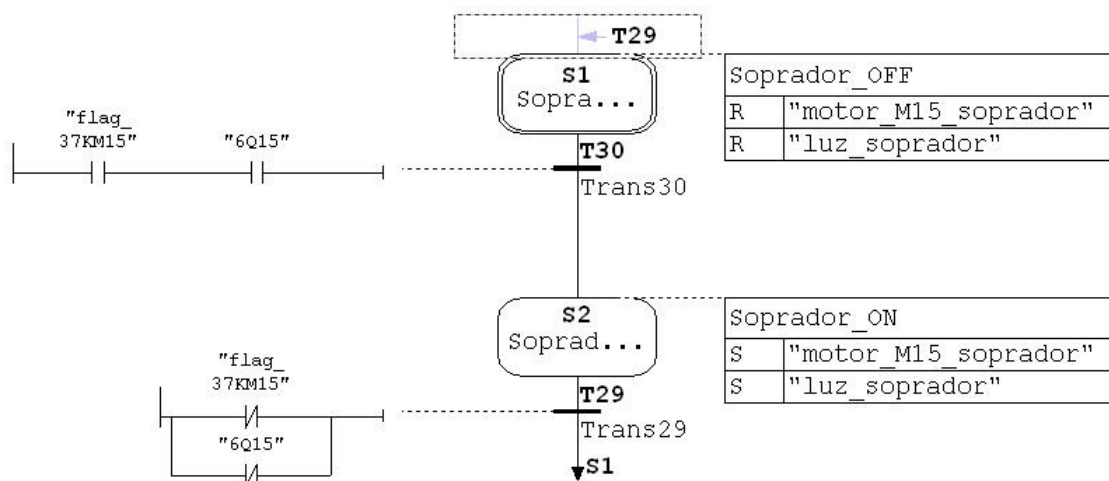


Figura 3.9: *Grafcet* do funcionamento do soprador

É possível verificar nas figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 os *grafcet* que vão efetuar o controlo de cada uma das várias funções do pasteurizador em túnel.

3.3 Testes

O próximo passo foi a implementação da lógica criada em *software* próprio para o efeito.

À medida que a lógica ia sendo criada, com a ajuda de um *PLC* virtual, iam-se fazendo testes de maneira a validar o funcionamento do que ia sendo programado. Isto é, utilizando o *PLC* virtual iam-se ativando as entradas e verificando se as saídas eram acionadas como idealizado, usando o *SCADA* como ferramenta visual para ajudar a identificar funcionamentos imprevistos.

Paralelamente com a programação da lógica, era concebido em *WinCC*, um *SCADA*. É boa prática qualquer projeto de automação ser complementado com uma ferramenta de supervisão, daí a planificação e programação de um elemento deste tipo, nesta dissertação. A interface criada, para além de ter como função efetuar a supervisão do todo processo, informando o utilizador o que está acontecendo em tempo real, ainda permite interagir com a máquina, substituindo desta forma o quadro elétrico e possibilitando controlar a máquina digitalmente.

Com a ajuda de um *PLC* virtual, foram impulsionadas as entradas e verificou-se se as saídas devidas eram ativadas. Desta forma foi possível confirmar se o programa se comportava como idealizado, e corrigidas as falhas à medida que iam sendo detetadas. Para a simulação foram substituídas as entradas e saídas físicas por posições de memória, só desta forma seria possível utilizar o *PLC* virtual. Na figura 3.10 está demonstrado isso mesmo, através dos vários blocos de memória (MB1, MB2, etc). Ao ativar as várias *checkboxes* simula-se a alimentação das entradas, e de acordo com o programa desenvolvido são desencadeadas ações e transições. No final, verificou-se se foi atingido o resultado obtido, normalmente com a ativação de uma saída.

O *SCADA* veio facilitar a tarefa, dado que programou-se uma réplica das funcionalidades do pasteurizador, e desta forma, permitiu ter uma ferramenta visual, usada para testar exaustivamente todas as funções a implementar.

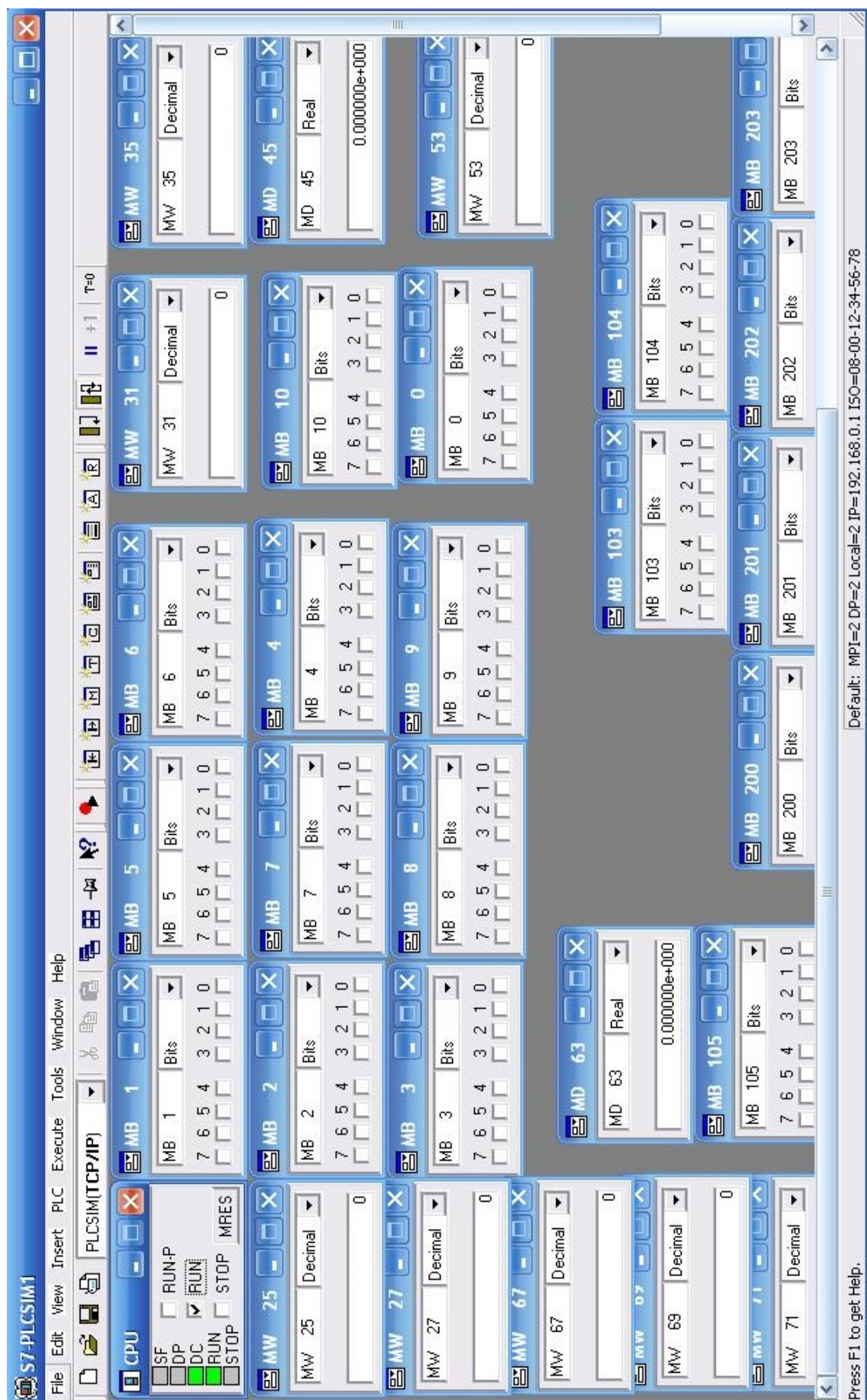


Figura 3.10: PLC virtual

Capítulo 4

Modelização do Controlo do Pasteurizador

Para se entender um pouco melhor o trabalho que foi feito e as melhorias que este projeto trouxe, é determinante conhecer o funcionamento da máquina de pasteurização e as suas principais características.

4.1 Análise teórica

4.1.1 Pasteurizador em túnel

A máquina denominada de pasteurizador é composta por um túnel em metal, dividido em várias zonas.

Fundamentalmente um pasteurizador submete recipientes preenchidos com um produto a sucessivas zonas, cada uma com chuveiros que pulverizam água a diferentes temperaturas conforme a zona onde estão inseridos. Um tapete transporta os recipientes por cada uma das zonas que compõe o túnel do pasteurizador. Durante o processo e dependendo da temperatura a que são submetidos os recipientes, o produto vai ganhando unidades de pasteurização que no final são contabilizadas.

A velocidade do tapete é estabelecida pelo utilizador, e uma vez que as dimensões do túnel são fixas, essa variação vai influenciar o tempo a que o produto é exposto a cada um dos banhos. Em cada zona, existem banhos com diferentes temperaturas definidas pelo utilizador. A temperatura é atingida em cada banho através da injeção de vapor proveniente das caldeiras das centrais existentes na fábrica.

Por norma os pasteurizadores em túnel possuem no início zonas de pré-aquecimento, para ocorrer uma elevação gradual da temperatura, para evitar choques térmicos e aumentos súbitos de pressão dentro das garrafas que as faça partir. Pode ou não haver uma zona de pré-pasteurização, onde o produto começa a ganhar unidades de pasteurização, seguida da chamada zona de pasteurização. Quando atinge o número de UP's predefinido, o produto é dirigido para as zonas finais,

que são as zonas de arrefecimento que inversamente às iniciais, vão arrefecer o produto até à temperatura ambiente, tal como demonstrado na figura 4.1. Esta transição tem de ser gradual, pelo mesmo motivo das zonas de aquecimento, para prevenir a quebra das garrafas devido ao choques térmicos. [12]

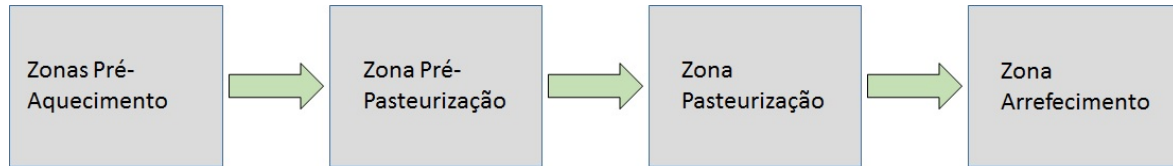


Figura 4.1: Fases do processo de um pasteurizador em túnel

4.1.2 Processo de pasteurização

A pasteurização consiste num tratamento térmico, que submete um produto a determinada temperatura por um período de tempo predefinido, com a finalidade de reduzir ao mínimo ou até eliminar totalmente a concentração de micro-organismos patogénicos, e dessa forma aumentar a durabilidade do produto.

De maneira a quantificar o efeito do processo, utilizam-se as Unidades de Pasteurização. No geral, as UP são calculada através da fórmula 4.1,

$$UP(t, T) = t \times 10^{\left(\frac{1}{z}\right)(T - T_{ref})} \quad (4.1)$$

em que o t é o tempo, em minutos, T representa a temperatura, em °C e z é temperatura decimal de redução, que varia de acordo com o produto que se pretende pasteurizar.

No que diz respeito à cerveja propriamente dita, z é 7 e T_{ref} para a cerveja é 60°C, resultando na fórmula 4.2

$$UP(t, T) = t \times 1.393^{(T - 60)} \quad [8] \quad (4.2)$$

Del Vecchio definiu que uma UP equivale a submeter uma garrafa de cerveja a uma temperatura de 60°C durante 1 minuto. [13]

Esta relação entre temperatura e tempo resulta nas UP's, e pode ser verificada no gráfico 4.2.

De acordo com a equação 4.2 percebe-se que para um determinado número de UP's é possível atingir com várias conjugações de temperaturas e intervalos de tempo. Posto isto, entende-se que quanto maior a temperatura menor será o tempo, já que são inversamente proporcionais. Contudo, tem de haver cautela ao submeter o produto a temperaturas acima dos 70°C. Temperaturas superiores a 70°C apesar de assegurarem uma eliminação maior de micro-organismos, poderiam

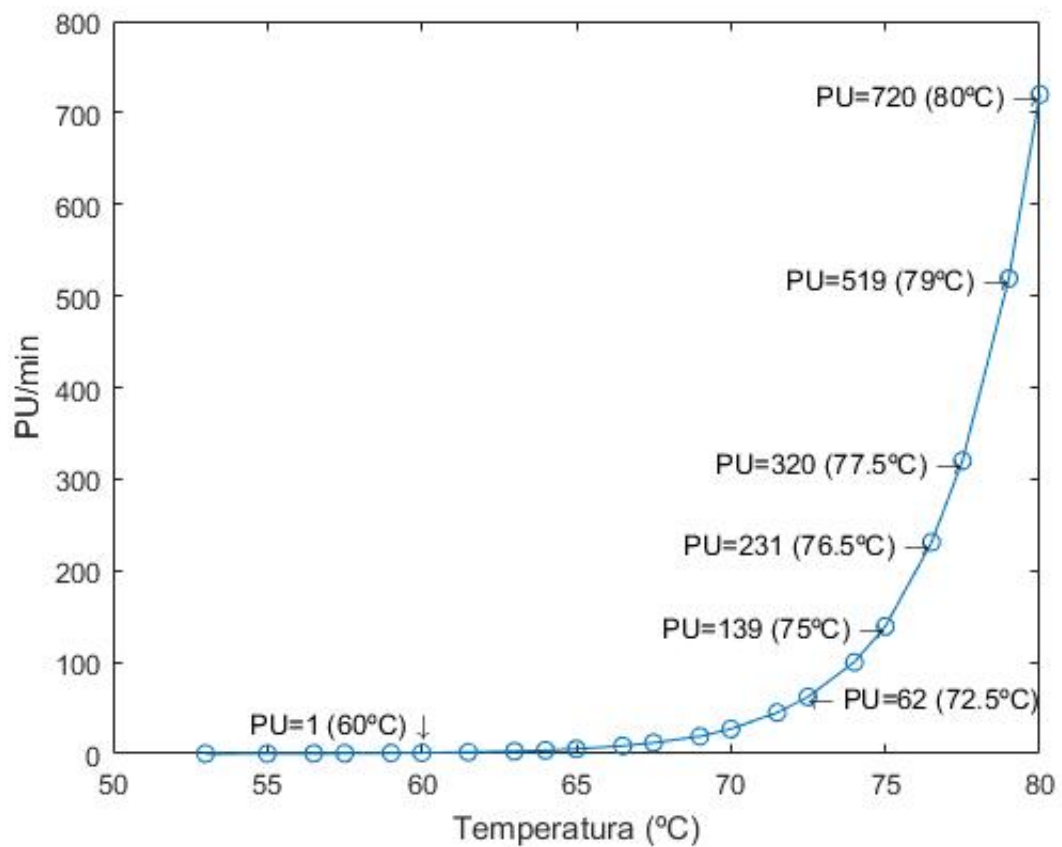


Figura 4.2: Gráfico que relaciona a temperatura dos banhos com as UP's/min

resultar em alterações das características da cerveja, como sabor ou constituição nutricional. Portanto, tem de haver um compromisso entre o número de UP's adicionadas ao produto e conservar as características originais.

De modo a cumprir com esse compromisso, existe um limite mínimo e máximo de UP's que deverão ser adicionadas ao produto. De acordo com uma das normas de segurança alimentar pela qual se rege a empresa, o limite mínimo de unidades de pasteurização de maneira a garantir que o produto pode ser consumido é 15 UP. Já o limite máximo é definido pela empresa, para evitar a alteração das características da cerveja, nomeadamente o sabor, e esse limite é 100 UP.

4.1.3 Circuito de água

Nos pasteurizadores mais desenvolvidos, a água inserida na máquina funciona em circuito fechado. Idealmente, uma vez atingidas as condições perfeitas de funcionamento, não será necessário injetar mais água, poupando recursos e aumentando a eficiência energética do pasteurizador.

Uma vez cheios os tanques, irá ocorrer uma reutilização de água entre as zonas de pré-aquecimento e as de arrefecimento. Como é possível verificar na figura 4.3, a água utilizada para arrefecer o produto nas zonas de arrefecimento, vai ser recolhida e empregada nas zonas de pré-aquecimento. Usando o próprio produto para aquecer ou arrefecer a água, tornando isto noutra poupança energética.

Basicamente após o consumo inicial de recursos, água e vapor, para atingir as condições necessárias para dar início ao processo, não vai ser necessária nenhuma energia se o pasteurizador se mantiver balanceado. O pasteurizador está balanceado enquanto houver uma quantidade de produto no seu interior que permita as trocas de energia do produto para a água dos banhos e vice-versa.

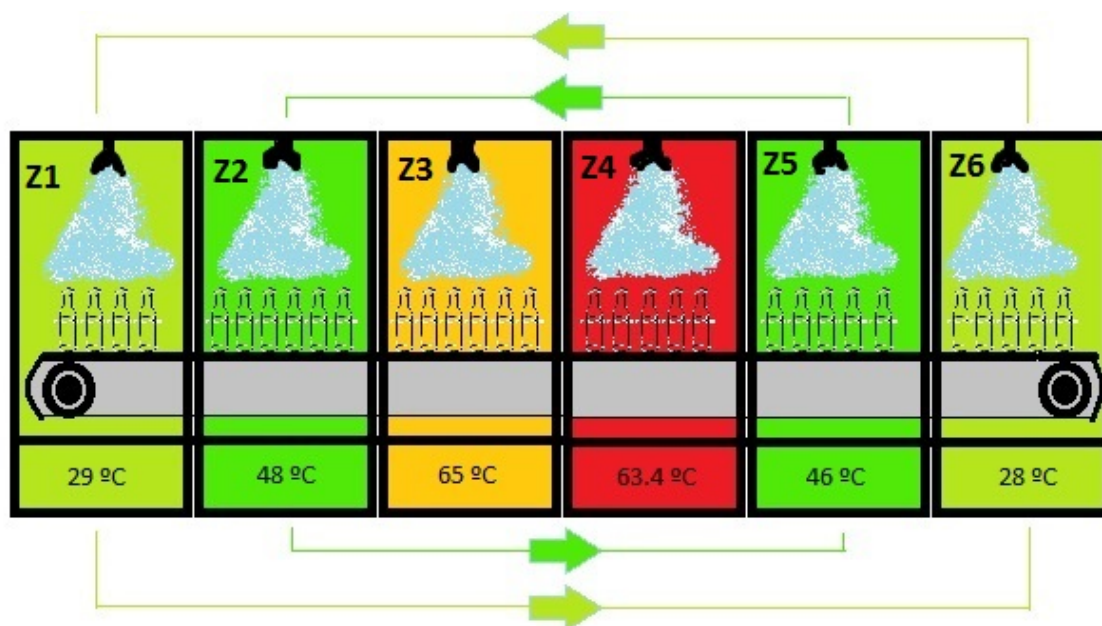


Figura 4.3: Esquema do circuito de água num pasteurizador em túnel

4.1.4 Pasteurizador da mini-fábrica

No caso do pasteurizador em análise, o pasteurizador da mini-fábrica, que é o objeto crucial no desenvolvimento desta dissertação, é composto por 6 zonas distintas, figura 4.4. A máquina no seu total tem o comprimento de 9,4 metros, mas de comprimento útil, isto é, desde o início do primeiro banho ao final do último totaliza 801.3 centímetros. É uma máquina desenhada apenas

para a pasteurização de garrafas, e tem uma capacidade de cerca de 1500 garrafas/hora. É um pasteurizador com um plano apenas (*single deck*).

É um pasteurizador já com circuito de reaproveitamento de água. Excepto os banhos de pré-pasteurização e de pasteurização, respetivamente Z3 e Z4, todos os outros são banhos de pré-aquecimento ou de arrefecimento e a água é recolhida e reaproveitada no banho correspondente, tal como foi detalhado em 4.1.3. Apesar de resultar numa poupança de energia, conforme já referido, esta reutilização dificulta a tarefa de modelização.



Figura 4.4: Pasteurizador em túnel

4.2 Modelo do processo de pasteurização

Estando a ser realizada esta dissertação em regime empresarial, é natural que haja algumas restrições quanto à utilização de determinados equipamentos. Neste caso, o pasteurizador a controlar é utilizado diariamente no normal funcionamento da fábrica, desta forma não é possível estar a utilizar a máquina real para testes. Em contrapartida, é possível usar dados reais do processo de pasteurização.

De maneira a testar o impacto dos vários fatores envolvidos no pasteurizador em túnel da empresa, elaborou-se um modelo do comportamento térmico da cerveja. O modelo visa testar a influência da velocidade do tapete e da temperatura dos banhos na evolução térmica da cerveja e, consequentemente no número total de unidades de pasteurização.

A máquina pasteurizadora a controlar, em específico, tem 4 modos de funcionamento.

Tabela 4.1: Modos de funcionamento do pasteurizador

Modo	Volume Garrafa	UP
1	330 ml	60
2		80
3	750 ml	60
4		80

Como suporte para o modelo criado, utilizaram-se gráficos fornecidos pelo fabricante da máquina e as equações da pasteurização. Gráficos esses representativos de cada um dos modos de funcionamento, como podemos constatar nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Mais detalhadamente, nos gráficos são definidas as temperaturas dos múltiplos banhos, é representada a evolução da temperatura do produto ao longo do tempo a que são submetidos aos banhos, e consequentemente a contagem de UP's agregadas ao produto. A verde é representada a contagem de UP's, enquanto os patamares são as temperaturas ideais de cada um dos banhos do processo de pasteurização em túnel, já a linha amarela demonstra a evolução da temperatura da cerveja. A linha amarela, sensivelmente a meio do gráfico torna-se vermelha, essa mudança é explicada porque as unidades de pasteurização só começam a ser somadas a partir de um valor de temperatura definido pelos produtores de cerveja. Observa-se que é precisamente quando a linha muda de cor, que as UP's começam a crescer.

Na análise aos gráficos, deparou-se com o primeiro inconveniente. Obteve-se o tempo total do procedimento mas não o tempo parcial em cada uma das zonas do túnel. Utilizando a lei de arrefecimento de Newton, equação 4.3, foi possível calcular cada um dos tempos, bem como a constante de tempo, α .

$$T = T_s - (T_s - T_o)e^{(-\alpha t)} \quad (4.3)$$

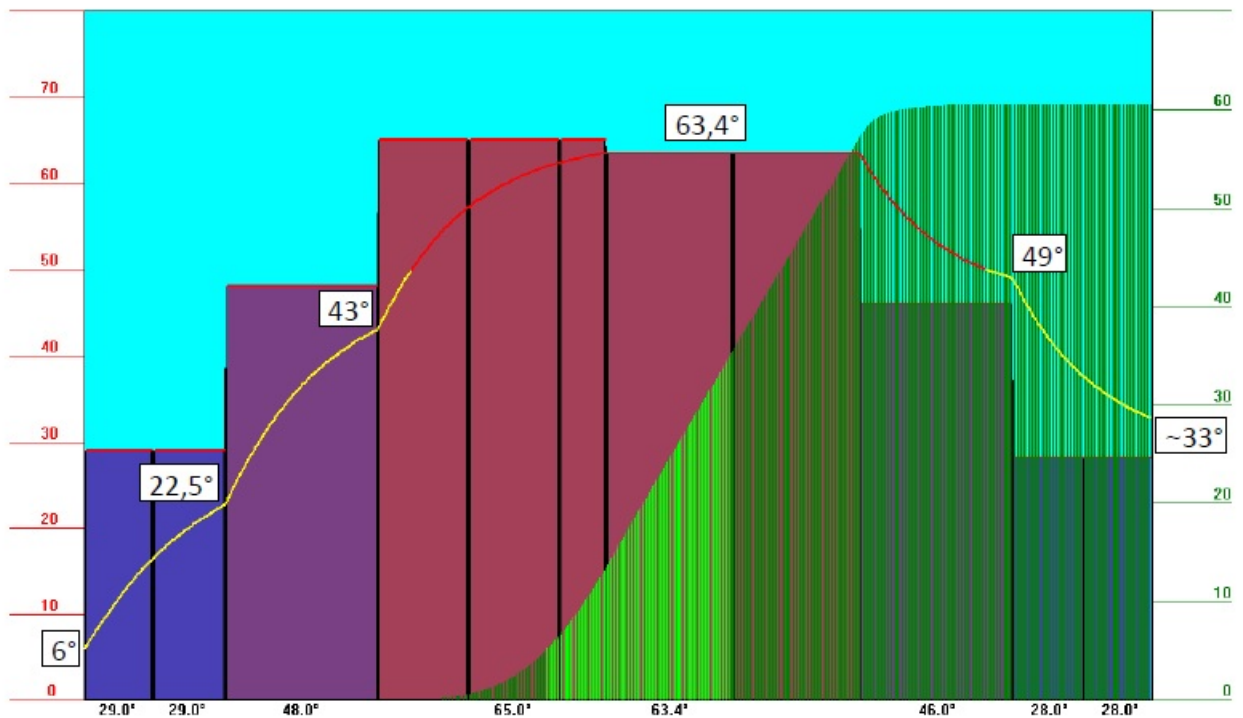


Figura 4.5: Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 1

Product : Beer – 1500 b/h - bottle 330 ml - d.70mm – Cycle time 58,8 min. – 80P

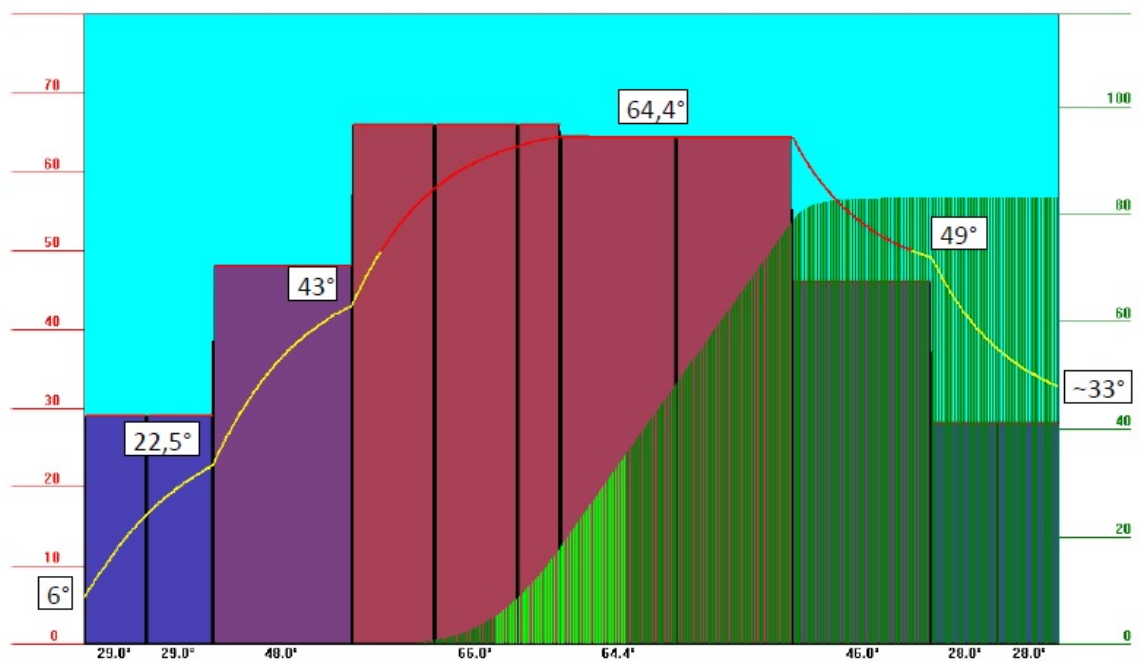


Figura 4.6: Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 2

Product : Beer – 750 b/h - bottle 750 ml - d.88mm – Cycle time 80 min. – 60UP

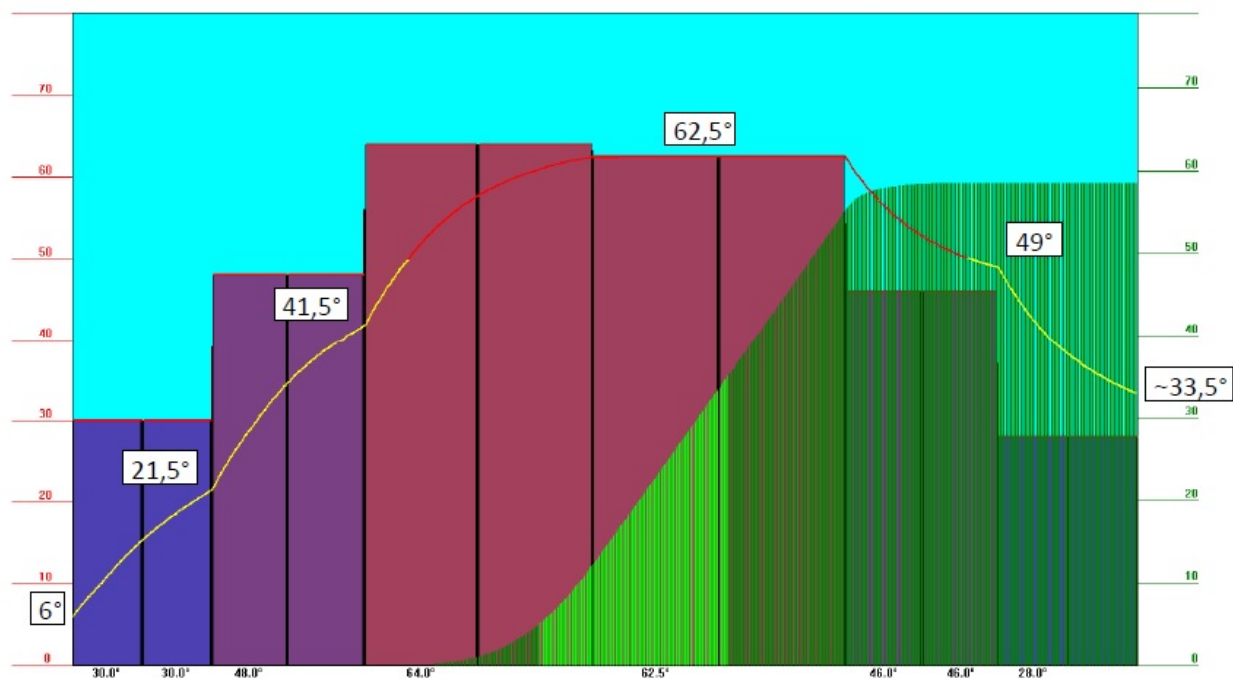


Figura 4.7: Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 3

Product : Beer – 750 b/h - bottle 750 ml - d.88mm – Cycle time 80 min. – 80UP

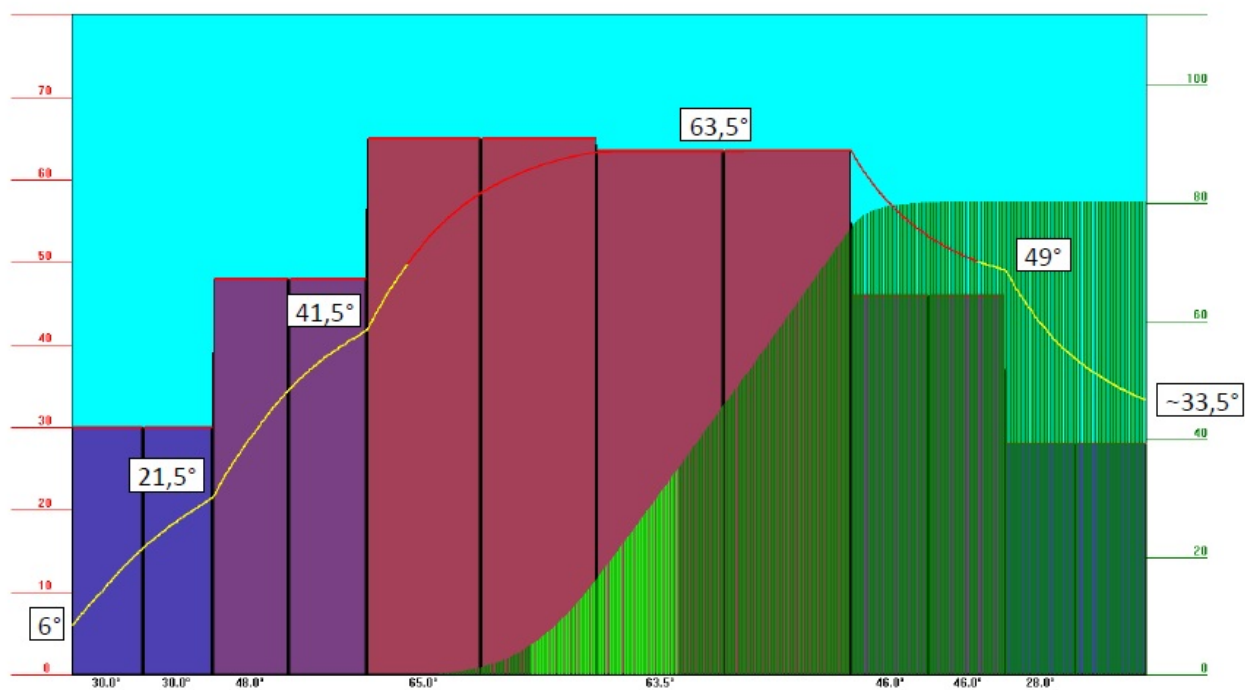


Figura 4.8: Gráfico de evolução da temperatura da garrafa no processo de pasteurização em modo 4

em que T_s é a temperatura da fonte, neste caso, é a temperatura da água do banho. T_o é a temperatura inicial da cerveja e T a temperatura da cerveja no instante t , em minutos. Apesar de a unidade SI do tempo ser o segundo, nesta dissertação a unidade utilizada para a contagem de tempo será o minuto, visto que é universal para o cálculo de UP usar-se o minuto.

Retirado dos gráficos, os valores iniciais e finais da temperatura em cada uma das fases, juntamente com o tempo total do ciclo foi possível calcular os intervalos de tempo em que o produto é submetido a cada uma das temperaturas. Vejamos como exemplo o ciclo da garrafa de 750 ml para 80 UP. Substituindo na fórmula 4.3

$$banho1: 21.5 = 30 - (30 - 6)e^{(-\alpha t_1)} \quad (4.4)$$

$$banho2: 41.5 = 48 - (48 - 21.5)e^{(-\alpha t_2)} \quad (4.5)$$

$$banho3: 63.5 = 65 - (65 - 41.5)e^{(-\alpha t_3)} \quad (4.6)$$

$$banho5: 49 = 46 - (46 - 63.5)e^{(-\alpha t_5)} \quad (4.7)$$

$$banho6: 33.5 = 28 - (28 - 49)e^{(-\alpha t_6)} \quad (4.8)$$

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 80 \text{ minutos} \quad (4.9)$$

Devido a não haver um aumento ou decréscimo de temperatura na Z4 (zona 4 do pasteurizador, onde ocorre o banho 4), não é possível calcular o tempo (t_4) através da equação 4.3. Contudo por essa mesma razão, é possível calcular através da fórmula geral das Unidades de Pasteurização na cerveja, equação 4.2. Através da análise do gráfico da figura 4.8, retira-se que no início do quarto banho a cerveja possui 16.09 UP e no final 76.136 UP. Conclui-se que durante o banho 4 foram adicionadas 60.046 UP ao produto. Aplicando à formula 4.2:

$$60.046 = t_4 \times 1.393^{(63.5-60)} \quad (4.10)$$

resulta que t_4 é 18.82 minutos.

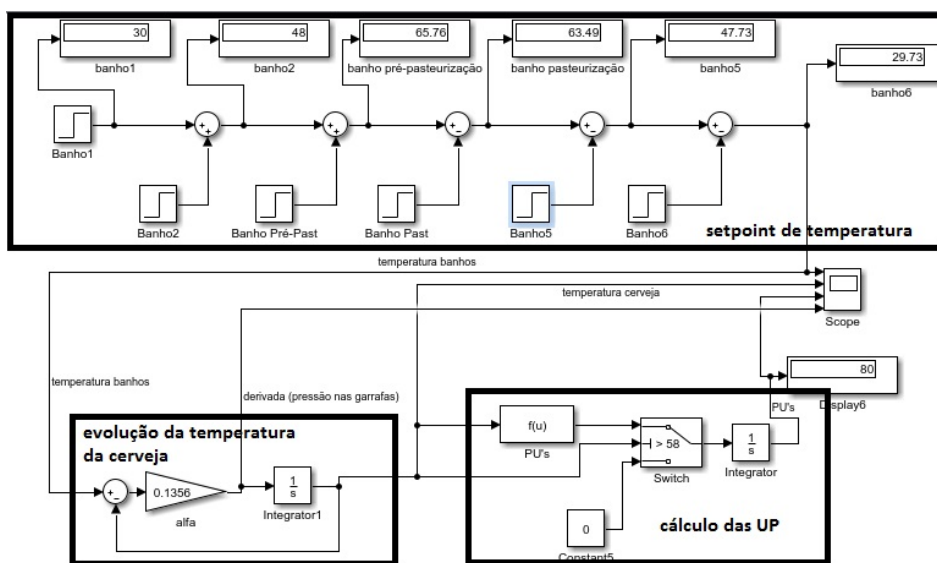
Desta forma, obtem-se 7 equações e 7 incógnitas. E assim calcularam-se os tempos para cada respectivo banho e a constante de tempo, tabela 4.2

Com os valores calculados, foi possível elaborar um modelo usando o *software Simulink*, conforme a figura 4.9.

Tabela 4.2: Variáveis para o ciclo de funcionamento para as garrafas 750ml-80 UP

α	0.1356
t_1	7.65 min
t_2	10.36 min
t_3	20.29 min
t_4	18.82 min
t_5	13 min
t_6	9.88 min

No modelo a secção superior é um conjunto de somatórios de degraus que compõe as *setpoint* de temperatura. A secção em baixo do lado esquerdo do modelo, representa uma equação de primeiro grau e no fundo vai originar a evolução da temperatura ao longo do tempo quando submetida a uma temperatura definida pelos *setpoint*. Do último conjunto de blocos, no canto inferior direito da figura 4.9, resulta a evolução das UP ao longo do tempo, segundo a equação 4.2, aplicada a um *switch* que o que faz é manter a 0 a quantidade de UP enquanto a temperatura da cerveja não atingir 58°C. Este valor é definido pela empresa, e só são contabilizadas as UP a partir desse valor.

Figura 4.9: Modelo em *Simulink* do processo de pasteurização

4.2.1 Verificação do modelo

Por norma, para validar um modelo verifica-se o erro entre os valores esperados e os valores do modelo. Neste caso, como não foi aplicado ao *PLC* para nos permitir ter dados, abordou-se a validação do modelo por outra forma. Utilizaram-se os valores discretos nos instantes de comutação, fornecidos nos gráficos teóricos, e compararam-se com os valores do modelo.

Na figura 4.10 podemos apurar que o modelo replica corretamente o gráfico que serviu de base para o estudo teórico. No instante $t_1 = 7.65$ o modelo prevê que a temperatura da cerveja

será 21.49 °C, coincidindo com o valor 21.5°C, mas é uma aproximação bastante satisfatória. E no instante $t_1 + t_2 = 7.65 + 10.36 = 18.01$, quer no modelo quer no gráfico fornecido a temperatura prevista é 41.5°C.

Para além disso, analisou-se também as UP, e confirmou-se a sensibilidade do modelo. Seguindo as temperaturas do gráfico, resultariam 80 UP mas através do modelo chegou-se à conclusão que afinal eram adicionadas 83.94 UP, uma variação de 5%.

Isto comprova que o modelo é válido, podendo ser utilizado para efetuar qualquer análise do processo.

Ficou demonstrado apenas o método de criação do modelo para a utilização de garrafas de 750 ml com 80 UP. Da mesma forma foram efetuados os cálculos para os restantes gráficos e os respetivos resultados demonstrados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5.

Através dos gráficos fornecidos, e não tendo a informação completa, foi possível através da metodologia descrita em 4.2.1, apenas conhecendo os valores de temperatura inicial e final, e do tempo de processo total obter toda a informação necessária. Deste modo, para pasteurizadores com distintas zonas, fazendo uma analogia com este método, é possível elaborar um modelo térmico do produto, seja ele qual for. Como comprovado com a análise feita nesta dissertação, para duas garrafas de diferente capacidade.

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que o processo de identificação do modelo é válido. Comparando os modelos para o mesmo tipo de garrafa, tabela 4.3 e 4.2, observa-se que a constante térmica tem uma variação de uma décima, o que para o caso pode-se considerar irrelevante e declarar o modelo apropriado.

Tabela 4.3: Variáveis para modo 3

α	0.134
t_1	7.75 min
t_2	10.49 min
t_3	20.21 min
t_4	18.86 min
t_5	12.72 min
t_6	10 min

Tabela 4.4: Variáveis para modo 2

α	0.1967
t_1	6.42 min
t_2	8.28 min
t_3	13.55 min
t_4	14.02 min
t_5	9.22 min
t_6	7.30 min

Tabela 4.5: Variáveis para modo 1

α	0.196
t_1	6.45 min
t_2	8.31 min
t_3	13.7 min
t_4	14.06 min
t_5	8.97 min
t_6	7.32 min

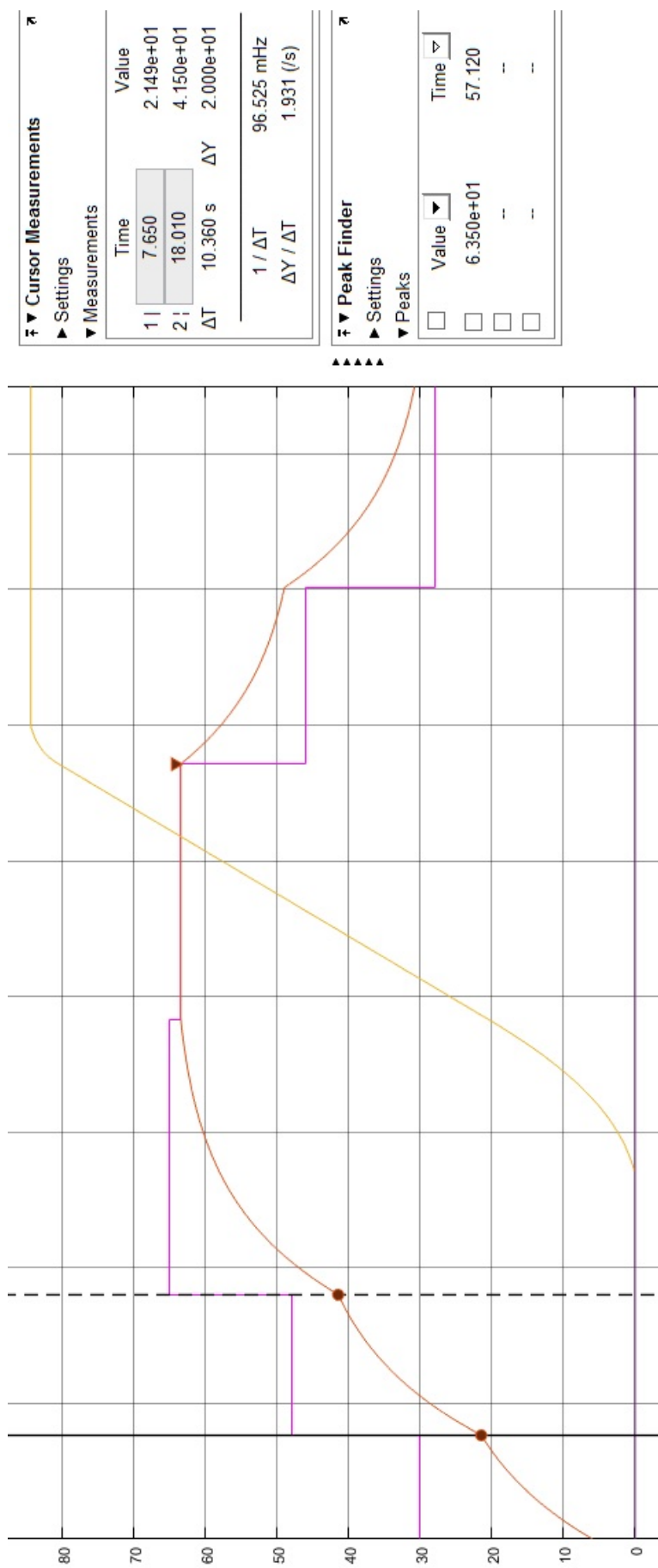


Figura 4.10: Gráfico resultante do modelo criado

Capítulo 5

Otimização do Pasteurizador

O que acontece numa máquina pasteurizadora, seja ela qual for, é que o túnel tem um determinado comprimento que está dividido em N zonas de comprimento arbitrário. Através do comprimento do túnel e da velocidade atribuída ao tapete de transporte, é obtido o tempo parcial (t_i) e total do processo de pasteurização.

Num processo de pasteurização são definidos os *setpoint* de temperatura (T_i), esses *setpoint* levam à alteração dos valores de temperatura no produto, neste contexto a cerveja. De acordo com os valores atingidos e com a fórmula acima mencionada 4.2, resulta uma quantidade de unidades de pasteurização que foram adicionadas ao produto. É precisamente esse o comportamento simulado pelo modelo descrito em 4.2.1, e simbolizado na figura 5.1.

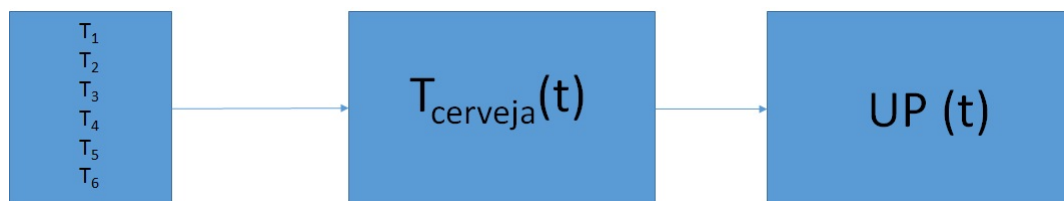


Figura 5.1: Sequência realizada pelo modelo

Isto é, nesta dissertação, a análise ao processo de pasteurização tem de ser feita de modo inverso. A empresa com o procedimento de pasteurização pretende agregar um determinado número de UP, sabendo que esse número de unidades de pasteurização vai conferir ao produto uma data de validade específica, representado na figura 5.2

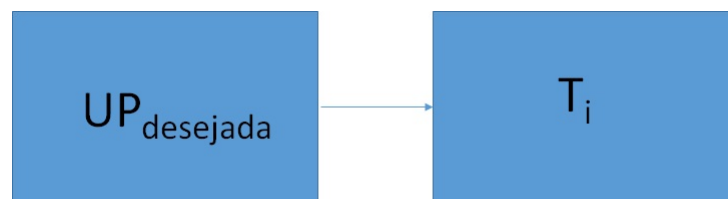


Figura 5.2: Sequência a efetuar pelo PLC

Porém a variação de unidades de pasteurização é não linear com alterações ao valor da temperatura, não tornando este exercício algo trivial de se calcular. Além disso, tendo o pasteurizador em túnel zonas a diferentes temperaturas e podendo ser definido pelo utilizador variadas velocidades do tapete, existem múltiplas combinações tempo/temperatura que possam resultar na mesma quantidade de unidades de pasteurização.

Complementando todo o projeto, criou-se uma ferramenta que irá apoiar a tomada de decisão acerca de quais as temperaturas dos banhos ideais e se a velocidade do tapete está devidamente ajustada ao comportamento pretendido.

Sumariamente, pretende-se fornecer ao *PLC* o valor de UP's pretendido e a velocidade a que opera o tapete, que é o mesmo que definir o tempo do processo. O autómato processa os dados e estabelece os *setpoint* de cada uma temperaturas (T_i).

Para se entender como esta ferramenta de apoio à decisão pode ser bastante útil, veja-se o funcionamento atual da máquina. Quando foram fornecidos os dados teóricos que se utilizou como base de todo o projeto, era expectável que fossem esses valores utilizados na máquina, mas os *setpoint* tinham sido ligeiramente alterados para responder melhor às exigências da empresa, como se observa comparando as figuras 5.3 e 5.4.

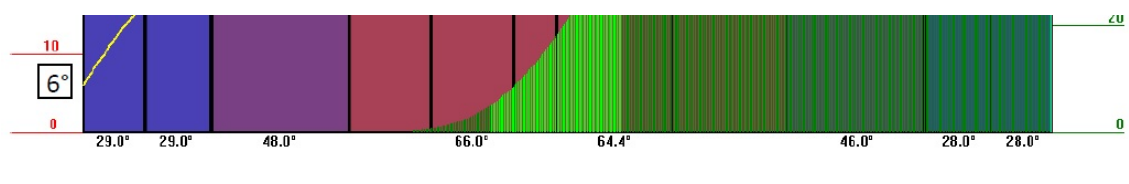


Figura 5.3: Valores teóricos dos *setpoint* dos banhos



Figura 5.4: Valores reais dos *setpoint* dos banhos

Sendo a Super Bock Group uma empresa, o seu objetivo principal será gerar lucro, métodos iterativos para além de custarem tempo, custam dinheiro em utilidades e em recursos humanos. O sistema de apoio à decisão elaborado vem substituir esse método, podendo desta forma ser escolhido com critério quais os *setpoint*, através da análise de cenários alternativos.

Iniciou-se a análise estabelecendo as restrições da máquina e do processo de pasteurização. Desta forma sabe-se quais serão os valores de temperatura viáveis, dentro das várias hipóteses.

Mais uma vez, recorreu-se aos gráficos fornecidos pelo fabricante da máquina, figura 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, como dados históricos. É de notar que a totalidade das unidades de pasteurização é

agregada apenas e só na zona de pré-pasteurização, zona de pasteurização e 1ª zona de arrefecimento (respectivamente Z3, Z4 e Z5). Isto é facilmente explicado pelo facto de apenas nestas três zonas a temperatura da cerveja atinge um valor superior ao definido para iniciar a contagem das UP's. Neste caso específico, esse valor é 58°C. Os banhos de Z1, Z2 e Z6 não vão ser estudados, mantendo-se os valores originais para evitar danos nas garrafas, devido a choques térmicos.

No entanto, existem algumas restrições quanto ao *setpoint* definido para as temperaturas pretendidas. Veja-se, nas figuras 5.5 e 5.6 é evidente que T_3 em ambos os casos tem como função aumentar a temperatura da cerveja até T_4 . Desta forma, T_3 é totalmente dependente de T_4 , diminuindo as variáveis controláveis.

Também Z5 tem restrições. Como detalhado em 4.1.3, a água utilizada para banhar as garrafas em Z5 vai ser recolhida, após banhar as garrafas e reutilizada em Z2. Ao banhar as garrafas, é transmitida energia térmica das garrafas (mais quentes) para a água (mais frias), fazendo com que esta aqueça. Uma vez que T_2 está limitado para não causar danos materiais às garrafas, simultaneamente T_5 também está limitado. Neste caso, a restrição não é tão limitadora quanto o caso de T_3 . Apesar de T_5 e T_2 estarem relacionados, T_2 poderá ser alterado já que o importante será garantir um intervalo entre T_2 e T_3 e entre T_2 e T_1 dentro da margem de segurança para não haver quebra de garrafas. A mesma analogia para os pares T_5 e T_4 , T_5 e T_6 . Isso vai permitir uma margem de modificação de T_5 , que é bastante útil para cumprir os requisitos do número de UP total.

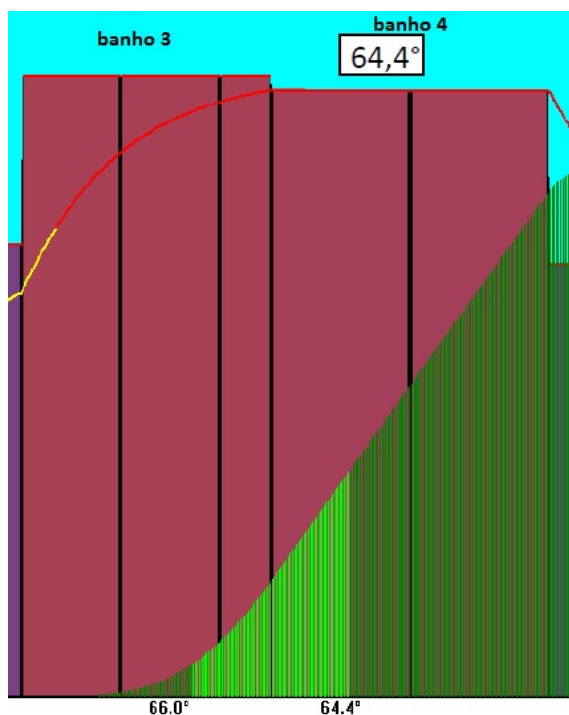


Figura 5.5: Transição da temperatura Z3-Z4

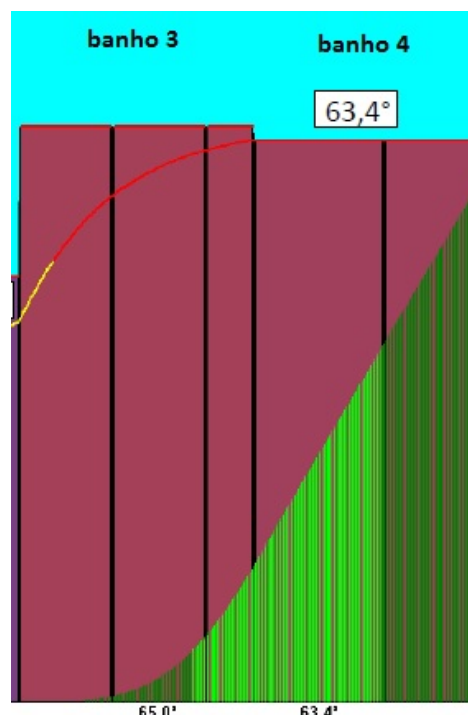


Figura 5.6: Transição da temperatura Z3-Z4

Ficam desta forma definidas as condicionantes às quais o controlador tem de obedecer.

É sabido que T_4 define T_3 , ficando a temperatura T_5 a ser utilizada para pequenos ajustes às UP finais.

Através do estudo dos gráficos conclui-se que é em Z4 que são adquiridas uma maior percentagem de UP. Dos dados históricos, constata-se que Z4 é responsável por atribuir entre 69% a 75% da totalidade das UP. Devido à não linearidade do comportamento das unidades de pasteurização às alterações de temperatura, uma variabilidade de 6% pode implicar a inviabilidade do processo por conflito com as restrições.

Sabendo, através dos dados históricos, que existe uma gama de valores de UP agregadas ao produto na Z4, foi por aí que se abordou a questão.

Para obter resultados consistentes com o pasteurizador a controlar, foi medido, com a ajuda de uma fita métrica, o comprimento de cada uma das zonas que constituem o pasteurizador (Δx_i). O pasteurizador em túnel deste projeto tem um comprimento total de 940 centímetros, mas de comprimento útil, isto é, desde o início do primeiro banho ao final do último totaliza 801.3 centímetros. Utilizando-se a fórmula da velocidade, e uma vez que sabemos o tempo total do processo, obtém-se o intervalo de tempo que leva as garrafas a atravessar cada uma das zonas.

Em *Simulink*, foi elaborado um programa que ao escolher a velocidade do tapete, define automaticamente os intervalos de tempo em cada zona do pasteurizador, figura 5.7.

Desta forma possui-se a primeira ferramenta capaz de fornecer informação que permita compreender a influência da velocidade do tapete no resultado final das unidades de pasteurização.

Desenvolvendo um pouco mais, foi necessário expandir esta ferramenta de modo a permitir definir o total de unidades de pasteurização pretendidas, deste modo pode resultar uma diversidade de T_i que conseguem satisfazer as condições impostas no início (velocidade do tapete e UP totais).

Para o estudo da evolução das UP, o foco foi em Z4, visto que a temperatura da cerveja na Z4 é constante e é nesta fase que é adicionado um maior número de unidades de pasteurização ao produto. Uma vez que os dados históricos nos fornecem a informação de que em Z4 é ganho cerca de 73% das UP, e que T_3 está dependente de T_4 , a ideia passou por aplicar-se diretamente a fórmula 4.2 considerando apenas e só Z4. Foi melhorado o programa anterior de maneira a calcular quais seriam as temperaturas dos banhos de T_4 para as quais resultariam uma determinada percentagem de UP, figura 5.8. Uma vez definido T_4 , utilizando o modelo térmico descrito em 4.2.1 e sendo T_3 dependente de T_4 , prontamente está definido T_3 . Utiliza-se apenas T_5 para completar o total de UP pretendido.

Após os valores serem definidos, foi criado uma tabela com as várias hipóteses de T_i , e analisado qual a melhor combinação de acordo com as restrições impostas pelo processo.

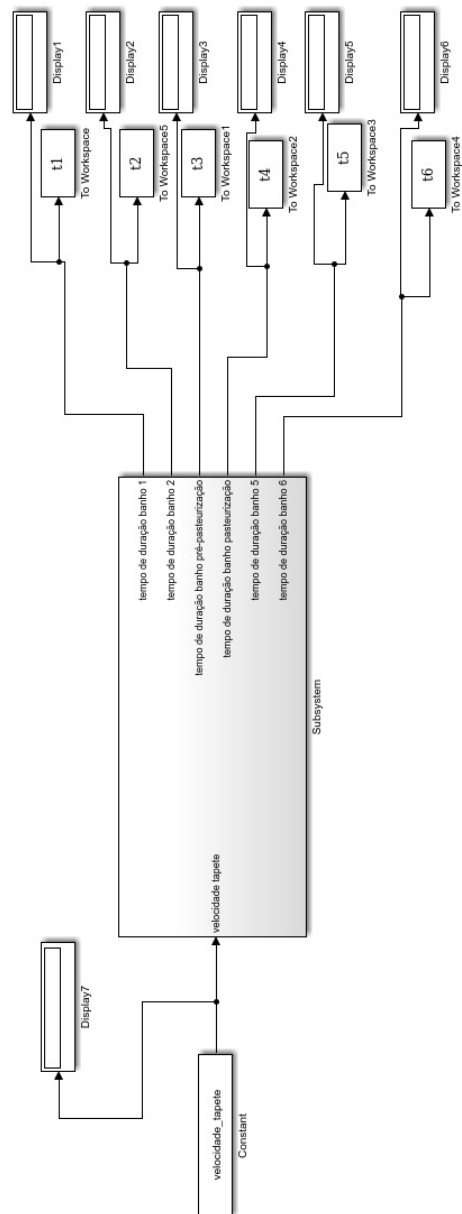


Figura 5.7: Programa em *Simulink* capaz de definir Δt_i

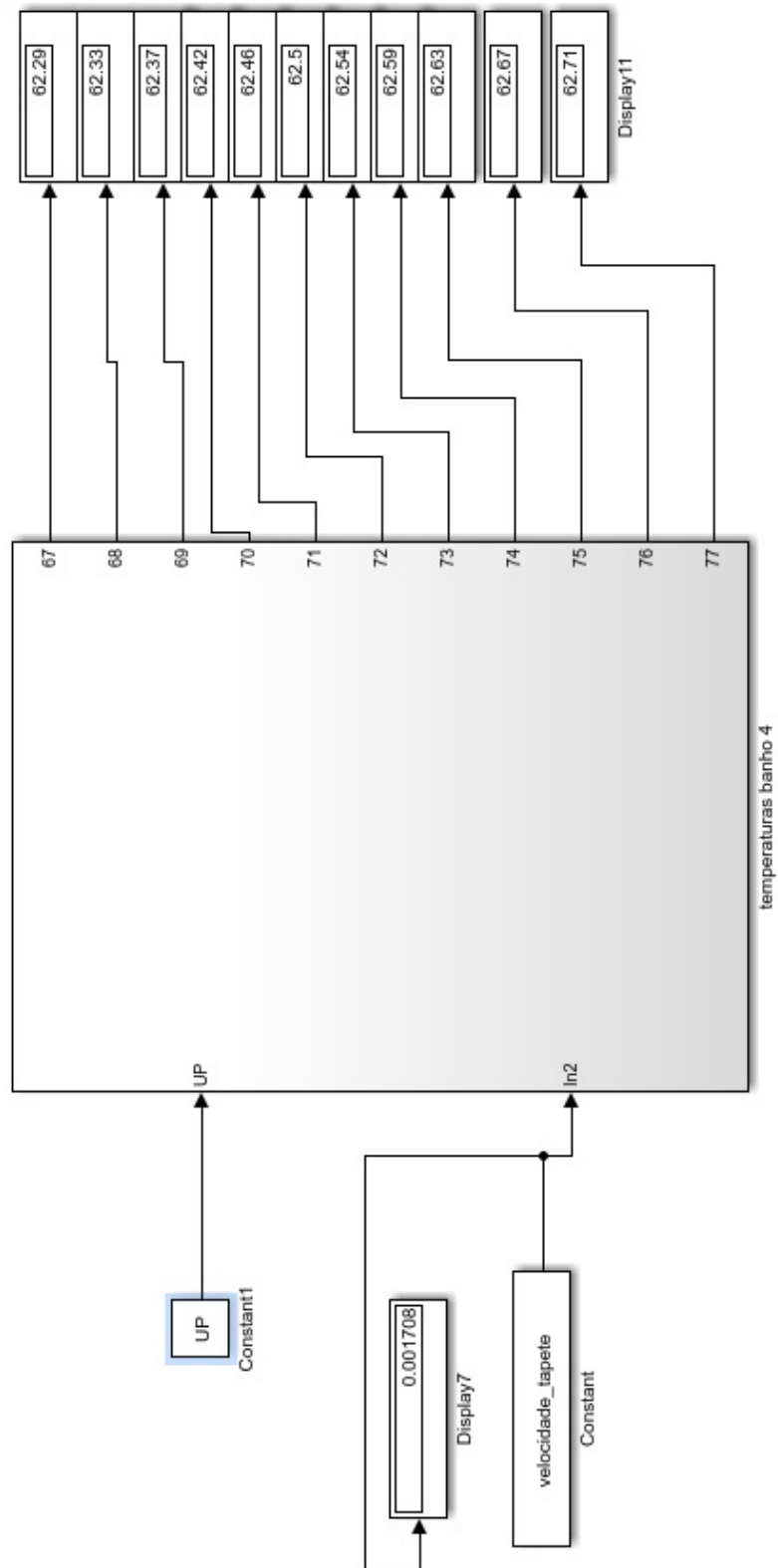


Figura 5.8: Programa em *Simulink* capaz de definir T_4

Capítulo 6

Resultados

Como forma de aferir se o *PLC* iria controlar o pasteurizador em túnel tal como pretendido, foi realizado um ensaio. Utilizando o funcionamento do pasteurizador real como termo de comparação e utilizando o *SCADA* criado como simulador.

Com a ajuda de um dos técnicos que controla o pasteurizador no seu dia-a-dia, replicou-se cada ação realizada na máquina, no simulador e observou-se os comportamentos de ambos.

Somente duplicando com sucesso o funcionamento do pasteurizador tal como estava, mas com recurso a um *PLC*, validaria o programa elaborado. Caso contrário, sem a implementação de um autómato programável não seria exequível qualquer alteração ao modo de funcionamento do processo de pasteurização.

Como referido no capítulo 3, o controlo do pasteurizador era primário, sendo efetuado apenas através de um quadro elétrico, figura 6.1. Para evitar grandes diferenças que pudessem ter impacto na produção, optou-se por criar um painel de comando na interface semelhante ao existente anteriormente, figura 6.2.

Nas figuras 6.3 e 6.4 pode-se observar alguns cenários da interface homem-máquina, que também foi utilizada para testar a lógica do *PLC*.



Figura 6.1: Quadro do pasteurizador

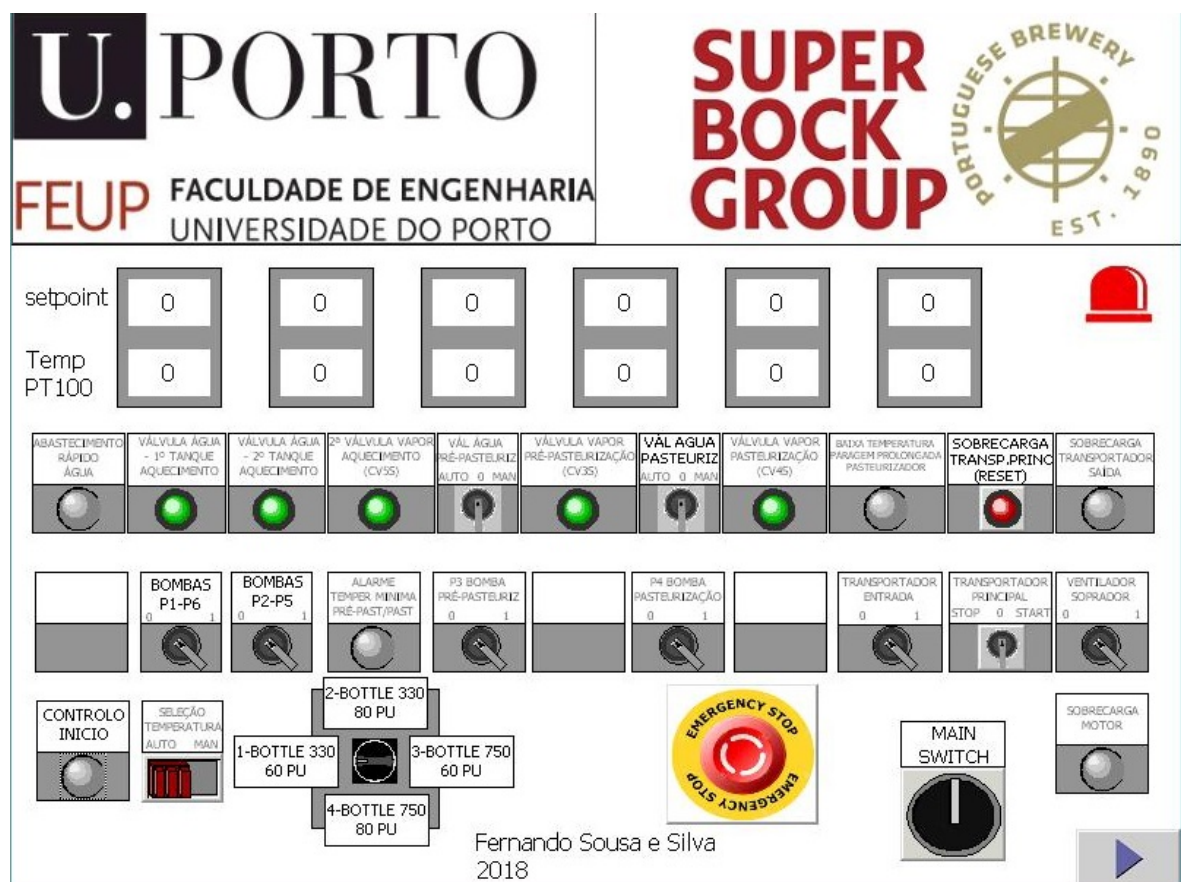


Figura 6.2: Painel de controlo da HMI que emula o quadro do pasteurizador

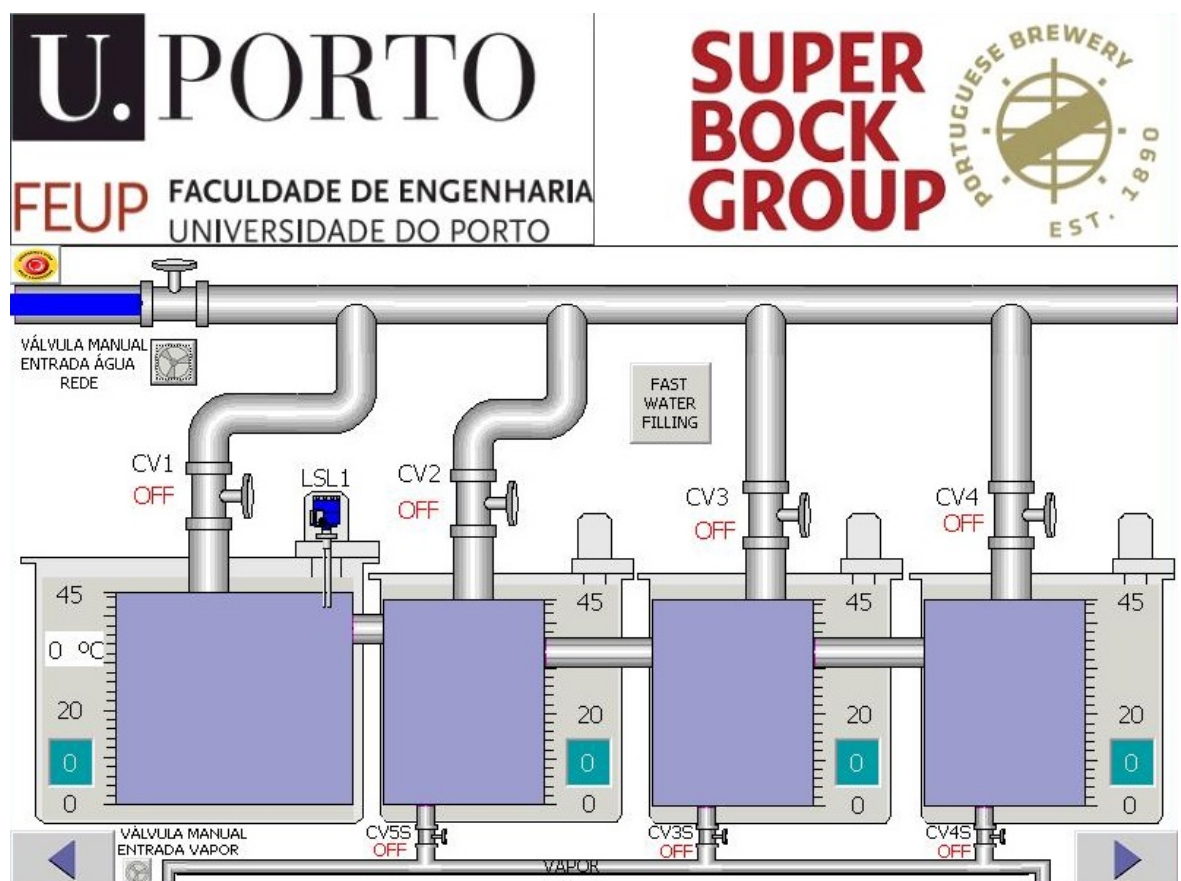


Figura 6.3: Painel que simula o enchimento dos tanques



Figura 6.4: Painel que simula o circuito da água

Em relação ao sistema de apoio à decisão, o resultado é uma tabela com as várias opções para as temperaturas dos banhos, nomeadamente T_3 , T_4 e T_5 . Tendo em conta as restrições, são definidas as temperaturas possíveis, como no exemplo da tabela 6.1.

De acordo com o modelo criado em 4.2.1, as combinações de temperatura demonstradas na tabela 6.1 resultam em 80 UP. A análise feita para a escolha de quais seriam as combinações ideais, tiveram como base o conjunto de restrições que o processo exige. Neste caso, ao definir-se que no banho 4 são adquiridas entre 67% e 74% das UP, de modo a obter-se no final 80 UP terá de ser adaptado o *setpoint* de T_5 . Para esses casos, T_5 teria de ser superior a T_2 , e o processo em si não permite isso, já que em T_5 existe transmissão de energia entre as garrafas e a água, aquecendo a água. Devido a essa transmissão, T_5 deverá ter um valor inferior a T_2 .

Quanto ao conjunto de *setpoint* em que o banho 4 transfere 77% das UP, nessa situação T_5 seria demasiado baixo, e a transmissão de energia das garrafas para água não seria suficiente para elevar a temperatura até ao valor de T_2 , que tem de ser muito próximo de 48°C.

Obteve-se apenas duas combinações de temperaturas que poderão satisfazer os interesses pretendidos. Desta forma, decidiu-se fazer um processo iterativo, e aprofundar os resultados obtidos e explorar novamente mas agora com valores entre os 74% e os 76%, que parecem ser os limites.

Tabela 6.1: Exemplo para as garrafas 750ml das combinações de *setpoint*

alvo UP	percentagem UP adquiridas banho 4	1º banho	2º banho	3º banho	4º banho	5º banho	6º banho
80	67	30	48	65,38	63,15	56,55	28
80	68	30	48	65,44	63,2	56,12	28
80	69	30	48	65,48	63,24	55,73	28
80	70	30	48	65,54	63,29	55,03	28
80	71	30	48	65,58	63,33	54,34	28
80	72	30	48	65,63	63,37	53,36	28
80	73	30	48	65,67	63,41	52,15	28
80	74	30	48	65,72	63,45	50,26	28
80	75	30	48	65,76	63,49	47,73	28
80	76	30	48	65,8	63,53	43,63	28
80	77	30	48	65,85	63,57	34,87	28

A primeira ilação que se tira da tabela 6.2 é que o processo de pasteurização é altamente sensível. Note-se que variações de centésimas de grau em T_3 e T_4 resultam em variações de ordem de grandeza de 1 grau centígrado.

Retira-se ainda que, por exemplo, a configuração para 75% da UP's é a que minimiza a diferença ($T_5 - T_2$). É também aquela em que as temperaturas T_3 e T_4 são menores, e é universal que temperaturas inferiores implicam menor custo energético.

Desta forma, traçou-se um conjunto de perfis que respeitam as restrições inerentes ao processo de pasteurização. Apesar de não haver indicação de fatores prioritários na seleção de um perfil preferencial, a obtenção dos perfis possíveis permite, de futuro, reduzir o custo de possibilidades para encontrar o valor ótimo.

Tabela 6.2: Novas combinações de *setpoint*

alvo UP	percentagem UP adquiridas banho 4	1º banho	2º banho	3º banho	4º banho	5º banho	6º banho
80	74.5	30	48	65,74	63,47	49,12	28
80	74.75	30	48	65,75	63,48	48,45	28
80	75	30	48	65,76	63,49	47,73	28
80	75.25	30	48	65,77	63,5	46,49	28
80	75.5	30	48	65,78	63,51	45,94	28
80	75.75	30	48	65,79	63,52	44,87	28
80	76	30	48	65,8	63,53	43,63	28

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Satisfação dos Objetivos

Para dar início à dissertação foi necessário bastante trabalho de pesquisa e investigação. Sendo o pasteurizador uma máquina com uma quantidade ampla de componentes, a análise do manual elétrico foi algo complicada devido à sua extensão. Para além do pasteurizador estar controlado por lógica cablada, uma técnica antiquada, não é dado grande ênfase durante a realização do curso de Engenharia, contribuindo para que fosse necessário muito trabalho de pesquisa para entender o significado da simbologia e assim interpretar o funcionamento do pasteurizador.

Por motivos alheios a esta dissertação e que são políticas da empresa não foi possível efetuar um teste tangível com o pasteurizador. O projeto assentou em testes em ambiente de simulação, e somente obtendo ambientes fidedignos, capazes de reproduzir as condições do pasteurizador ou do processo de pasteurização permitiriam que as ilações e resultados obtidos, fossem válidos e confiáveis para a aplicação real. A obtenção desses ambientes simulados fieis foram uma das grandes dificuldades sentidas.

Ainda assim, recorrendo a simulações pode afirmar-se que após a implementação de todas as ferramentas criadas ao longo deste projeto, o pasteurizador passará a ter um equipamento capaz de melhorar o controlo da máquina, ao torná-lo mais evoluído tecnologicamente, ao permitir armazenar dados e ao ser mais flexível a qualquer alteração de funcionamento.

Unicamente essa alteração do equipamento de controlo iria permitir aplicar o estudo profundo que foi efetuado sobre o processo de pasteurização num pasteurizador em túnel e a partir desse estudo, foi criado também uma ferramenta de apoio à decisão sobre quais os *setpoint* ideais para obter um determinado comportamento do processo, em termos de UP's.

7.1.1 Principais Contribuições

No âmbito desta dissertação, foi realizado um conjunto de tarefas técnico-científicas, tendo conduzido a três principais contribuições:

1. elaboração e validação de um processo de identificação de um modelo térmico capaz de definir a evolução da temperatura de um produto;
2. escolha, montagem e programação de um autómato programável;
3. estruturação de um algoritmo que vai viabilizar atingir várias combinações de T_i para um número de UP estipulado.

No final da dissertação a empresa ficou com um estudo bastante válido e com um projeto totalmente desenvolvido para melhorar a máquina pasteurizadora em todos os aspetos, quer da eficiência, quer do processo de pasteurização ser mais preciso, quer do próprio controlo da máquina.

o trabalho ficou concluído dentro do prazo previsto e poderá agora ser aplicado na respetiva fábrica e facilmente expandido a outras máquinas.

7.2 Trabalho Futuro

No que diz respeito a trabalho futuro, seria interessante aplicar este controlo a um pasteurizador real. Após uma dedicação intensa a um projeto desta dimensão fica uma sensação de vazio por não ter sido efetuado um teste na máquina real.

Um aspeto adicional a considerar e que traria bastantes benefícios à empresa, seria definir critérios para a escolha do perfil de temperatura, com base em poupança de vapor ou de água, por exemplo. Desta forma, seria escolhido o perfil de temperatura que melhor servisse os interesses da Super Bock Group.

Referências

- [1] Ying Zhang, Yong Zheng, Zhong Xue, e Shiliang Zhang. The Temperature Monitoring System Based on S7-200 PLC and Configuration Software. páginas 1256–1261, 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.336-338.1256.
- [2] SPX. Beer Processing Solutions, 2008.
- [3] Bent Stig Enevoldsen. Determining Pasteurization Units From Residual Melibiase Activity in Lager Beer. *American Society of Brewing Chemists*, 43:183–189.
- [4] Copyright International e Electrotechnical Commission. INTERNATIONAL STANDARD. 2003, 2003.
- [5] ABB. Measurement and automation in breweries, 2016.
- [6] OMEGA. "RTD Specifications", PT100 datasheet.
- [7] Anita Maria Fernandes e Tiago Franzen. Automação e Controle em uma Micro Cervejaria Artesanal. página 13. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2011.
- [8] Roland Feilner e T Oehmichen. Flash Pasteurisation of Filtrated- and Wheat Beer with one Heat Holding Tube. *BrewingScience*, 69(October):64–72, 2016.
- [9] Ariéder Anselmo e Willian Zielonca. *Automatização do equipamento de pasteurização PZ501-001*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [10] Pavel Jonás. *Modelling and Control of Tunnel Pasteurizers*. Tese de doutoramento, Czech Technical University, 2009.
- [11] Siemens. SIEMENS 6ES7318-2AJ00-0AB0 SIMATIC. páginas 1–9, 2018.
- [12] D E Briggs, P a Brookes, R Stevens, e C a Boulton. *Brewing: Science and Practice (Google eBook)*. 2004. URL: <http://books.google.com/books?id=mROkAgAAQBAJ{%&}pgis=1>.
- [13] By Carsten Zufall, Karl Wackerbauer, Technische Universität Berlin, e Fachgebiet Brauwesen. The Biological Impact of Flash Pasteurization Over a Wide Temperature Interval. 106(3):163–168, 2000.